

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KELVIN WILLIAM DE SOUZA SIQUEIRA

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ESPACIAL DO PWV-GNSS VISANDO A
INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS: ESTUDO DE CASO PARA A
SERRA DO MAR PARANAENSE

CURITIBA

2020

KELVIN WILLIAM DE SOUZA SIQUEIRA

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ESPACIAL DO PWV-GNSS VISANDO A
INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS: ESTUDO DE CASO PARA A
SERRA DO MAR PARANAENSE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.
Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Pereira Krueger
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Sapucci

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S618a Siqueira, Kelvin William de Souza
Análise da correlação espacial do PWV-GNSS visando a investigação de fenômenos
atmosféricos [recurso eletrônico] : estudo de caso para a serra do mar paranaense / Kelvin William
de Souza Siqueira. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientadora: Cláudia Pereira Krueger.
Coorientador: Luiz Fernando Sapucci.

1. Geodésia. 2. Climatologia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Krueger, Cláudia Pereira. III.
Sapucci, Luiz Fernando. IV. Título.

CDD: 526.1

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **KELVIN WILLIAM DE SOUZA SIQUEIRA** intitulada: **Análise da Correlação Espacial do PWV-GNSS Visando a Investigação de Fenômenos Atmosféricos: Estudo de Caso para a Serra do Mar Paranaense**, sob orientação da Profa. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Julho de 2020.

Assinatura Eletrônica

04/08/2020 17:45:47.0

CLAUDIA PEREIRA KRUEGER
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

02/08/2020 19:56:00.0

REINALDO BOMFIM DA SILVEIRA
Avaliador Externo (INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR)

Assinatura Eletrônica

31/07/2020 19:17:09.0

TIAGO LIMA RODRIGUES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

31/07/2020 19:15:38.0

TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Com todo o carinho, dedico esta dissertação àqueles que até aqui me deram todo o suporte, apoio e motivação para buscar minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aqueles que inspiram e motivam, e que mostram o amor maior em qualquer situação. Agradeço aos meus pais Neri José Florêncio de Siqueira e Gilsemara de Souza, e também a minha avó Sieni de Souza, os três marcos zero da minha vida, responsáveis por criar a personalidade e caráter que tenho hoje. Também agradeço ao meu irmão Melvin Douglas Souza Siqueira, por todos os momentos de ajuda mútua que temos, pois em relação aos desafios do desenvolvimento pessoal até o momento, não há quem me entenda melhor.

À minha orientadora, professora e amiga Dra. Cláudia Pereira Krueger, que desde a graduação investe no meu desenvolvimento profissional e pessoal, sendo muitas vezes compreensiva e paciente durante processos de maturidade e aprendizado. Agradeço por todas as horas boas e gratificantes que tivemos juntos e por me ajudar a ser quem hoje sou, sendo minha inspiração ao longo desta caminhada.

Também agradeço ao meu co-orientador, Dr. Luiz Fernando Sapucci, pelas diversas discussões técnico-científicas durante o decorrer deste mestrado, auxiliando e prezando pelo sucesso da pesquisa e qualidade do trabalho, e pelas conversas motivacionais importantes que tivemos ao longo dos três últimos anos.

Agradeço ao meu marido Paulo Henrique de Souza, que me apoia e me incentiva em todas as conquistas e objetivos. Agradeço a companhia, a compreensão e também a ajuda nas atividades de campo desta pesquisa. Agradeço por ser um exemplo de como um ser humano pode ser bom, modesto e dedicado em situações adversas.

À todos os integrantes do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia com quem tive contato e de alguma maneira me auxiliaram no desenvolvimento de pesquisas científicas. Agradeço as horas de conversa, tranquilidade e diversão, além do apoio em debates técnicos. Em especial agradeço ao Christian Gonzalo Pilapanta Amagua, pela ajuda essencial em vários pontos deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos, essenciais na vida de um ser humano, que sem pedir nada em troca constantemente nos ajudam a ser pessoas melhores, e deixam os desafios mais leves e fáceis de serem superados. Destaco meus amigos e irmãos

de consideração Kaique Ramos, Kauê Vestena, Mauro Vestena (*in memorian*), Mara de Moraes, Thairine Pilar, Juliana Zanini e Kelly Kawahara. Agradeço especialmente ao Clauber Rogério da Costa, pois além de ser um amigo de muita consideração, também contribuiu muito para meus marcos profissionais e pessoais.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), por mais uma vez me dar a oportunidade de hoje finalizar uma etapa da minha vida. Muito além dos diplomas e formações, a UFPR é responsável por me proporcionar novas visões do mundo, me ajudando a ser um ser humano melhor, e a compreender a diversidade e problemáticas da sociedade.

Ao Grupo Index e seus diretores e coordenadores, por serem compreensíveis quando precisei me ausentar dos meus afazeres profissionais para propósito deste trabalho. Agradeço aos contínuos aprendizados técnicos e gerenciais que proporcionam diariamente aos seus funcionários.

Às instituições SIMEPAR, INMET e EPAGRI por disponibilizar seus dados meteorológicos para realização dessa pesquisa. Também agradeço a todos que permitiram acesso às estações usadas neste trabalho: ao Professor Marlos José da França (Instituto Federal Catarinense), a empresa Bruschie & Lepper S.A.(Unidade BEL MAG), ao Iate Club Caiobá (sede Ponta do Morro), a diretoria da Escola Municipal Prof. Gil Feres (Antonina), a APPA (Administração dos Portos de Antonina e Paranaguá), ao Professor Marcelo Renato Lamour (Universidade Federal do Paraná), a Prefeitura Municipal de Paranaguá, a Ana Carolina Pires Moreira (Sanepar) e ao Samuel Duleba (Fundação Grupo Boticário/Reserva Natural de Salto Morato).

Agradeço a CAPES pela bolsa de pós-graduação fornecida nos primeiros 18 meses do mestrado, e deixo minhas sinceras esperanças de que no atual momento político-econômico do país o investimento em educação e pesquisa não seja prejudicado, mas sim aprimorado para o futuro da nação.

Por fim, agradeço a todos os demais que estiveram de alguma maneira relacionados a esta pesquisa ou a minha vida profissional.

*“Renda-se, como eu me rendi. Mergulhe no que você não conhece,
como eu mergulhei. Não se preocupe em entender, viver ultrapassa
qualquer entendimento.”*

*Perto do Coração Selvagem (1943)
Clarice Lispector*

RESUMO

O vapor d'água atmosférico (PWV, acrônimo em inglês de *Precipitable Water Vapor*) é uma variável com alta dinâmica no espaço e tempo, e por isso monitorá-lo continuamente é uma tarefa difícil e de alto custo. O presente trabalho visa apresentar uma proposta para monitoramento contínuo do PWV, em um estudo de caso sobre a região da Serra do Mar paranaense. Este estudo explora dados de 6 estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) por período de três semanas, instaladas na região de estudo. Nos processamentos dos dados GNSS foi utilizado o PPP-IBGE, e as estimativas do PWV foram obtidas empregando metodologia sugerida por bibliografias consagradas. A metodologia de estimativa PPP-IBGE foi validada através de comparação com resultados obtidos pelo software científico *Bernese*®. Análises de correlação de dados e técnicas de interpolação geoestatística foram aplicados a fim de investigar a dependência espacial do PWV na região e a viabilidade de empregar tais dados em estudos climáticos e meteorológicos. Foram avaliadas as dependências entre as séries temporais obtidas por todas as estações GNSS, por meio de coeficiente de correlação, análise de componentes principais e testes de homogeneidade regional. Para a interpolação espacial dos dados foram avaliados três métodos: inverso da distância, krigagem universal e krigagem universal ponderada pela altitude (co-krigagem colocalizada), sendo que este último se apresentou melhor que os demais em até 79,76%. Os resultados interpolados foram úteis para obtenção de série temporal que auxilie a detecção de passagens de zonas frontais pelo local, o que foi investigado pela comparação com cartas sinóticas de superfície geradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ao fim verificou-se que o PWV-GNSS das estações utilizadas possuem forte correlação e a região pode ser considerada homogênea em termos de água precipitável, com a ressalva da diferença em altitude que impacta consideravelmente os resultados. Corrigindo este efeito sistemático, a metodologia se apresenta adequada para os objetivos que se propõe.

Palavras-chave: PWV; homogeneidade; geoestatística; geodésia; climatologia

ABSTRACT

Precipitable Water Vapour (PWV) is a variable with high time-space dynamics, so monitoring it is a difficult and high-cost work. This research aims to present a proposal to continuous monitoring of PWV, through a study case at the Paraná's Coast Mountain Range. It investigates data from 6 GNSS (Global Navigation Satellite System) stations, located in the study region for an uninterrupted period of three weeks. For the data processing it was used the PPP-IBGE application, and the PWV were estimated through reliable methodology found in literature. The PPP-IBGE PWV values were validated using scientific software Bernese®. Data correlation analysis and geostatistics interpolation methods have been applied to investigate the spatial dependency of PWV and to check the viability of the technique for weather and climate studies. The dependency of the time series between all stations were analysed using correlation coefficients, principal components analysis and regional homogeneity tests. For step of data interpolation three methods were verified: inverse distance weighting, universal kriging and universal kriging weighted by altitude (colocalized co-kriging). The last one was better than the others, improving the results in up 79,76%. The interpolation was useful to get a time series that subsidizes the analysis of zonal front passages at the study region. It has been proven through comparison to the synoptics maps created by the Brazilian Institute for Space Research (INPE). It has been verified that the PWV-GNSS values obtained from the GNSS stations have high correlation, and the region is homogeneous in terms of precipitable water. For this result, the elevation gradient needs to be considered, and after this correction the methodology becomes appropriated for the proposed objectives.

Keywords: PWV; homogeneity; geostatistics; geodesy; climatology

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO GNSS.....	32
FIGURA 02 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE REFRAATIVIDADE	36
FIGURA 03 – ILUSTRAÇÃO DA CURVATURA DOS SINAIS GNSS	36
FIGURA 04 – EXEMPLO DE CONVERGÊNCIA PPP	41
FIGURA 05 – CAMADAS ATMOSFÉRICAS TERRESTRES	43
FIGURA 06 – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO DE KRIGAGEM	53
FIGURA 07 – EXEMPLO DE SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAL E TEÓRICOS	56
FIGURA 08 – PARÂMETROS DE CORRELAÇÃO ESPACIAL	57
FIGURA 09 – ESQUEMA DE ETAPA DE ANÁLISE DE CORRELAÇÃO	68
FIGURA 10 – ESQUEMA DE ETAPA DE INTERPOLAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE FRENTE	69
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	71
FIGURA 12 – MAPA DE PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA COM DADOS DO SENSOR TRMM	72
FIGURA 13 – PRECIPITAÇÃO ANUAL SEGUNDO SATÉLITE TRMM	72
FIGURA 14 – EXEMPLOS DE a) RELEVO E b) CLIMA DO LOCAL DE ESTUDO	73
FIGURA 15 – ESTAÇÕES ELEMENTARES E TRIÂNGULO DE INVESTIGAÇÃO	74
FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VERIFICAÇÃO	76
FIGURA 17 – EXEMPLOS DOS PROCEDIMENTOS DE CAMPO NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	78
FIGURA 18 – COMPONENTES TRIDIMENSIONAIS LEVANTADAS ENTRE O PIQUETE E O BARÔMETRO	79
FIGURA 19 – EXEMPLOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS VINCULADAS	80
FIGURA 20 – MODELO DIGITAL DE TERRENO EMPREGADO NA INTERPOLAÇÃO	85
FIGURA 21 – EXEMPLO DE CARTA SINÓPTICA DO INPE PARA O DIA 02/12/2019	87
FIGURA 22 – DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS (PPP-IBGE VERSUS BERNESE).....	89
FIGURA 23 – HISTOGRAMAS (VALIDAÇÃO PPP-IBGE).....	90
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS AVALIADOS E DE REFERÊNCIA (VALIDAÇÃO PPP-IBGE)	91
FIGURA 25 – DISCREPÂNCIAS DE PWV PARA A ESTAÇÃO SCAQ	93
FIGURA 26 – DISCREPÂNCIAS DE PWV-GNSS PARA A ESTAÇÃO ANT	95
FIGURA 27 – DISCREPÂNCIAS DE PWV-GNSS PARA A ESTAÇÃO PIR.....	97
FIGURA 28 – SÉRIES TEMPORAIS PWV-GNSS	99
FIGURA 29 – SÉRIES TEMPORAIS PWV-GNSS SEPARADAS POR GRUPOS DE ALTITUDE	101
FIGURA 30 – GRÁFICOS DE VIOLINO PARA CADA ESTAÇÃO GNSS	103
FIGURA 31 – HISTOGRAMAS DE VALORES PWV-GNSS PARA NEIA E SCAQ	105
FIGURA 32 – GRÁFICO PAIRWISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES	106
FIGURA 33 – SÉRIES TEMPORAIS DAS COMPONENTES CP1, CP2 E CP3.....	107
FIGURA 34 – GRÁFICO PAIRWISE DE CARREGAMENTOS DAS ESTAÇÕES GNSS	108
FIGURA 35 – RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL EM MOMENTO DE BAIXO PWV .	110
FIGURA 36 – RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL EM MOMENTO DE ALTO PWV ...	111

FIGURA 37 – SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL DOS VALORES PWV-GNSS.....	114
FIGURA 38 – SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL DOS VALORES PWV-GNSS APÓS CORREÇÃO DA DIFERENÇA DEVIDO A ALTITUDE.....	115
FIGURA 39 – REGRESSÃO LINEAR NA ANÁLISE DOS INTERPOLADORES	116
FIGURA 40 – GRÁFICOS DE DISTORÇÃO DOS CONJUNTOS INTERPOLADOS	118
FIGURA 41 – CARTAS SINÓTICAS DOS MOMENTOS DE PASSAGEM DE FRENTE	121
FIGURA 42 – DESTAQUES PARA PASSAGEM DE FRENTE NAS SÉRIES TEMPORAIS	122
FIGURA 43 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 1º EVENTO FRONTAL	124
FIGURA 44 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 2º EVENTO FRONTAL	125
FIGURA 45 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 3º EVENTO FRONTAL	126
FIGURA 46 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 4º EVENTO FRONTAL	127

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – INFORMAÇÕES DE DISPONIBILIZAÇÃO DE EFEMÉRIDES	38
TABELA 02 – PRINCIPAIS ERROS NO POSICIONAMENTO GNSS	39
TABELA 03 – CONSTANTES EMPREGADAS NAS MODELAGENS PWV	51
TABELA 04 – HORÁRIOS DE RASTREIO.....	77
TABELA 05 – INFORMAÇÕES SOBRE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.....	80
TABELA 06 – DISTÂNCIAS E DESNÍVEIS ENTRE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E ESTAÇÕES GNSS	83
TABELA 07 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS (PPP-IBGE VERSUS BERNESE)	88
TABELA 08 – RESULTADOS DA ESTATÍSTICA U PARA VALIDAÇÃO DO PPP-IBGE.....	90
TABELA 09 – RESUMO ESTATÍSTICO DAS DISCREPÂNCIAS PARA SCAQ (VÍNCULO A BARÔMETROS)	93
TABELA 10 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS PARA ANT (VÍNCULO A BARÔMETROS)	95
TABELA 11 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS PARA PIR (VÍNCULO A BARÔMETROS)	97
TABELA 12 – DESCRITORES ESTATÍSTICOS DOS CONJUNTOS PWV-GNSS	102
TABELA 13 – PERCENTUAL DE CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES PWV-GNSS.....	106
TABELA 14 – PERCENTUAL DE VARIÂNCIAS EXPLICADAS POR CADA CP	106
TABELA 15 – VALORES DE CARREGAMENTOS DAS ESTAÇÕES GNSS	108
TABELA 16 – RESULTADOS DOS TESTES DE HOMOGENEIDADE REGIONAL.....	109
TABELA 17 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE IDW.....	112
TABELA 18 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE UK.....	113
TABELA 19 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE UK-EW.....	115
TABELA 20 – RESULTADOS DO TESTE MANN-WITHNEY PARA A ETAPA DE INTERPOLAÇÃO	119

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACP – Análise de Componentes Principais

ANT - Estação GNSS instalada no município de Antonina/PR

BKG - *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*

BMF – *Brazilian Mapping Function*

CEM - Estação GNSS instalada no município de Centro de Estudos do Mar/PR

CGS – *Canadian Geodetic Survey*

CNM – Confederação Nacional de Municípios

CODE – *Center for Orbit Determination in Europe*

COMPASS/BEIDOU – Sistema de Navegação e Posicionamento Chinês

CP – Componentes Principais

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

CSRS – *Canadian Space Reference System*

DGNSS – *Differential Global Navigation Satellite System*

DH – Distância Horizontal

DX – Diferença em coordenada X

DY – Diferença em coordenada Y

DZ – Diferença em coordenada Z

ECMWF – *European Center for Medium-Range Weather Forecasts*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

ERA-40 – Modelo de re-análise da atmosfera global

FAO – Food and Agriculture Organization

FTP – *File Transfer Protocol*

GALILEO – Sistema de Posicionamento e Navegação Europeu

GLONASS - *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*

GMF – *Global Mapping Function*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

GPT – *Global Pressure and Temperature*

GPT2 – *Global Pressure and Temperature 2*

IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Nacional de Geografia e Estatística

IDW – *Inverse Distance Weighting*

IERS – *International Earth Rotation Service*

IGS – International GNSS Service;

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social

IPCC – International Panel on Climate Change

IRNSS – *Indian Regional Navigation Satellite System*

ITCG – Instituto de Terras Cartografia e Geociências do Paraná

IWW – *Integrated Water Vapour*

JPL – *Jet Propulsion Laboratory*

L1 – Onda portadora L1;

L2 – Onda portadora L2

L5 – Onda portadora L5

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MODIS – *Moderate Resolution Image Spectroradiometer*

MPNT – Modelo Numérico de Tempo

NASA – *National Aero Space Administration*

NAVSTAR – *Navigation Satellite with Time and Ranging*

NEIA – Estação GNSS da RBMC localizada em Cananéia/SP

NGS – *National Geodetic Survey*

NMF – *Niell Mapping Function*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NRCAN – *Natural Resources Canada*

ONG – Organização Não-governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

PIR – Estação GNSS instalada no município de Piraquara/PR

PPP – Posicionamento por Ponto Preciso

PWW – *Precipitable Water Vapour*

QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RINEX – *Receiver Independent Exchange Format*

RTK – *Real Time Kinematic*

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SCAQ – Estação GNSS da RBMC localizada em Araquari/SC;

SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná

SIRGAS – Sistema de Referência para as Américas

SLR – *Satellite Laser Ranging*

TEC – *Total Electron Content*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

UFPR – Estação GNSS da RBMC localizada em Curitiba/PR;

UK – *Universal Kriging*

UK-EW – *Universal Kriging Elevation Weighted*

UTC – *Universal Time Coordinated*

VMF – *Vienna Mapping Function*

WGS – *World Geodetic System*

ZHD - *Zenit Hydrostatic Delay*

ZTD - *Zenith Total Delay*

ZWD - *Zenit Wet Delay*

LISTA DE SÍMBOLOS

\emptyset_i	– Fase da onda portadora gerada no receptor
\emptyset^n	– Fase da onda portadora geradas no satélite
C_0	– Componente Pepita de semivariograma teórico
D_i^n	– Distância geométrica entre o satélite n e o receptor i
H_0	– Hipótese Nula
H_1	– Hipótese Alternativa
I_i^n	– Refração ionosférica
PD_i^n	– Pseudodistância entre o satélite n e o receptor i
P_s	– Pressão superficial
R_w	– Constante específica do vapor d'água
T_i^n	– Refração troposférica
T_s	– Temperatura superficial
dm_i^n	– Magnitude do efeito de multicaminho
dt_i	– Erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS para o instante da observação
dt^n	– Erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS para o instante de emissão
t_3	– Assimetria
t_4	– Curtose
z_w^{-1}	– Inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água;
Ω_i^n	– Ambiguidade na portadora observada
ε_i^n	– Conjunto de erros existentes de menor magnitude nos sinais GNSS
λ_1	– Momento descritivo de ordem 1
λ_2	– Momento descritivo de ordem 2
λ_3	– Momento descritivo de ordem 3
ρ_w	– Umidade absoluta;

C	– Celsius
G_m	– Constante Gravitacional Efetiva
h	– Altura da camada troposférica
H	– Valor da Estatística Hosking-Vallis
hPa	– Hectopascal
J	– Joule
K	– Kelvin
Kg	– Quilograma
km	– Quilômetro
m	– Metro
N	– Índice de Refração Atmosférico
P	– Pressão
R^2	– Coeficiente de Determinação
s	– Segundos
T	– Temperatura
T_m	– Temperatura Média da Coluna Neutrosférica
UR	– Umidade Relativa
X	– Eixo das abscissas no Sistema Cartesiano Geocêntrico
Y	– Eixo das ordenadas no Sistema Cartesiano Geocêntrico
Z	– Eixo das cotas no Sistema Cartesiano Geocêntrico
C	– Componente Patamar de semivariograma teórico
E	– ângulo de elevação do sinal recebido
R	– Distância geométrica entre os centros de fase das antenas do satélite e do receptor
U	– Valor da Estatística Mann-Whitney
a	– Componente Alcance de semivariograma teórico
c	– Módulo de velocidade de propagação da luz no vácuo

ds	– Representação de parte infinitesimal da trajetória percorrida pelo sinal
e	– Pressão parcial do vapor d'água;
k	– Constante da refratividade do ar;
mh	– Função de mapeamento para a componente hidrostática
mf	– Função de mapeamento
mw	– Função de mapeamento para a componente úmida
n	– Número de valores amostrais
p	– Ponderador
Δt	– Diferença de tempo entre a emissão do sinal pelo satélite e recepção pelo receptor
Ψ	– Relação existente entre o atraso úmido e IWW
α	– Nível de significância
λ	– Comprimento da onda portadora
φ	– Latitude
γ	– Longitude

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo Geral	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
1.2	JUSTIFICATIVA	26
2.	REVISÃO DE LITERATURA	30
2.1	POSICIONAMENTO PELO GNSS	30
2.1.1	Princípio de funcionamento	31
2.1.2	Fontes de erros	34
2.1.3	Posicionamento por Ponto Preciso	39
2.2	MODELOS TROPOSFÉRICOS E O ATRASO ZENITAL	42
2.2.1	Modelagem Troposférica Aplicada a Processamentos GNSS	45
2.3	GNSS-MET	47
2.4	INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA	51
2.4.1	Método do Inverso das Distâncias	54
2.4.2	Krigagem	55
2.4.3	Técnicas de Krigagem	58
2.5	INFERÊNCIA ESTATÍSTICA	59
2.5.1	Teste Mann-Whitney (<i>U</i>)	60
2.6	ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS	62
2.7	TESTE DE HOMOGENEIDADE REGIONAL	63
3.	METODOLOGIA	66
3.1	REGIÃO DE ESTUDO	70
3.2	COLETA E AQUISIÇÃO DE DADOS	73
3.2.1	Estações elementares	73
3.2.2	Estações de Verificação	75
3.2.3	Dados meteorológicos	77
3.3	VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO PWV USANDO O PPP-IBGE	81
3.4	ANÁLISE DE DISTÂNCIAS PARA VÍNCULO A BARÔMETROS	83
3.5	ESTUDO DE HOMOGENEIDADE LOCAL	84
3.6	INTERPOLAÇÕES ESPACIAIS	85
3.7	IDENTIFICAÇÃO DE PASSAGEM DE FRENTES	86
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PPP-IBGE PARA PWV	88
4.2	IMPACTO DA DISTÂNCIA DO BAROMETRO NA QUALIDADE DO PWV	92
4.2.1	Análise SCAQ	92
4.2.2	Análise ANT	95
4.2.3	Análise PIR	97
4.3	PARÂMETROS DE HOMOGENEIDADE REGIONAL	99

4.4	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	110
4.5	IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES PARA PASSAGEM DE FRENTE	120
5.	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS.....	132
	ANEXOS	145

1. INTRODUÇÃO

Para a meteorologia, a troposfera é a porção inferior da atmosfera terrestre, compreendida entre o solo e a estratosfera, e é onde se observa a transferência de calor entre a superfície e as demais camadas. Sua faixa limite é denominada de tropopausa e apresenta altitude média de 9 km no polo a 15 km, porém com variações no tempo e espaço, pois está correlacionada a dinâmica das variáveis de temperatura e pressão. Barry e Chorley (2013) comentam que esta camada é detentora de 75 % de toda a massa molecular e gasosa da atmosfera, e nela ocorrem os fenômenos relacionados à concentração e dinâmica de gases como aerossóis, CO₂ e vapor d'água. A expressão de 99% de todo o vapor d'água e aerossóis contidos na atmosfera estão concentrados na troposfera, e nela ocorre os principais fenômenos atmosféricos, tais como evapotranspiração, formação de nuvens, ocorrência de chuvas entre outros. Estes fenômenos são alguns dos principais eventos atmosféricos responsáveis pelo equilíbrio hidrológico, troca de gases e manutenção da vida no planeta. Os fenômenos associados à alta troposfera estão entre as ocorrências de maior impacto a sociedade, tais como ventos extremos, granizo, precipitação e ciclones, e ocorrem devido a movimentação das massas de ar e as bruscas variações de densidades e temperaturas entre elas (ANDREWS *et. al.*, 1987). O conhecimento das ocorrências e a caracterização desses eventos são importantes para o estabelecimento de condições socioambientais, visando controle e mitigação de riscos, assim como zoneamentos agro meteorológicos (MOTA, 1981).

Estudos climáticos visam analisar e diagnosticar eventos da atmosfera assim como definir o clima de uma região, baseando-se, conforme explicam Kousky e Molion (1985), no comportamento dos chamados “controles climáticos”, que nada mais são que variáveis físicas que expressam a característica climática local, tais como temperatura, umidade, radiação solar etc. Neste contexto são relevantes as denominadas “regiões frontogenéticas”, regiões propícias a formação de frentes, eventos originados do encontro de massas de ar com diferentes densidades e temperaturas. Tais regiões apresentam significativa ocorrência de chuvas, conforme mostram autores como Kousky (1979), Oliveira (1986) e Mattos (2004). O zoneamento ambiental e monitoramento contínuo de regiões frontogenéticas são úteis para o ramo da meteorologia e modelagem numérica, que visa quantificar, localizar e prever a intensidade de eventos severos, fornecendo estimativas

climatológicas, que são úteis para o planejamento e execução de diversas atividades econômicas.

Muitas das atividades de zoneamento levam em consideração a identificação de regiões homogêneas considerando variáveis climáticas (ou clusterização). A homogeneidade troposférica de uma determinada região é geralmente determinada pela análise do comportamento espaço-temporal das variáveis de temperatura, pressão e direção/intensidade de ventos, conforme exemplificado em Gonçalves (2007), Bonato (2014) e Reynaud (2008). Nesse sentido, outro gradiente climático muito importante (porém de complexa modelagem) é o conteúdo de vapor d'água precipitável (*Precipitable Water Vapour*, ou PWV), tido como a quantidade de água líquida em milímetros contido na direção zenital de um ponto após condensação, e cuja fortes variações ocorrem devido ao transporte de umidade dentro das massas de ar pré-frontais (Seluchi et al., 2017). Deste modo, o conteúdo e variação de vapor d'água refletem a quantidade de água que pode ser convertida em chuva, sendo uma informação útil para o desempenho de modelos de previsão numérica de tempo (MPNTs). Como o conteúdo de vapor d'água presente na troposfera é altamente variável no espaço-tempo (BARRY e CHORLEY, 2013), sua quantificação em tempo real requer o emprego de técnicas mais sofisticadas do que os sensores convencionais.

A estimativa do PWV é efetuada por meio de coletas de dados diretas ou indiretas, cujo tratamento destes dados permite alimentar MPNTs e desenvolver modelos meteorológicos, conforme explica Karabatić et al. (2011). Valores estimados para esta variável são fornecidos por diversas técnicas, que podem ser classificadas segundo seus custos financeiros ou a qualidade de seus dados (SAPUCCI, 2005). Atualmente, diversas técnicas modernas têm sido empregadas para estimativas PWV, dentre elas destacam-se:

- Medidas de brilho aparente do céu por meio de radiômetros, relacionadas matematicamente ao conteúdo de vapor d'água (e.x.: MARÍN *et. al.*, 2015);
- Sensores hiperspectrais e radares de imageamento a bordo de satélites, com tratamento digital de pixels (e.x.: LI *et. al.*, 2003);
- Medidas diretas a partir de sondagens atmosféricas empregando radiossondas (e.x.: ALMAZÁN *et. al.*, 2016); e
- Rastreios GNSS, e respectiva estimativa do atraso zenital troposférico em suas observáveis (e.x.: BENEVIDES, 2016).

Todas as técnicas citadas anteriormente podem colaborar para estudos PWV, cada uma com sua respectiva precisão, resolução espacial e tempo de coleta. Considerando o

alto custo do lançamento de radiossondas e a instável sensibilidade dos radiômetros à variações de temperatura, fatores esses que impactam na obtenção apropriada do PWV, as soluções geodésicas apresentam-se com uma boa alternativa neste monitoramento, pois apresentam baixo custo e resultados consistentes (NING *et. al.*, 2011). Dois exemplos de técnicas geodésicas adaptadas para o tema são os dados provenientes de sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e sensores imageadores multi e hiperespectrais (como o MODIS - *Moderate-Resolution Image Spectroradiometer*). Estas técnicas fazem uso das propriedades de interação entre a atmosfera e as ondas eletromagnéticas, que por sua vez permitem a extração indireta de informações importantes para estudos meteorológicos. De fato, tais técnicas apresentam resultados satisfatórios para diversas aplicações, como previsão de tempo, monitoramento de desastres naturais e tomografia 3D da atmosfera, e a bibliografia já apresenta resultados de sua eficácia, como Karabatić *et al.* (2011), Li *et al.* (2015), Benevides (2016), Webb *et al.* (2016), Alraddawi *et al.* (2018), Sapucci *et al.* (2007) e Sobrino *et al.* (2003). Além do baixo custo, tais técnicas também possuem vantagens devido ao seu potencial para altas resoluções espaciais e temporais, como relata o trabalho de Bock *et. al.* (2007).

Em regiões onde a constante incidência de nuvens atrapalha o tratamento de dados de radiômetros e demais sensores hiperespectrais, os modelos tornam-se limitados em termos de estimativa PWV e previsão de tempo, o que afeta a acurácia de MPNTs no local (Sobrino *et al.*, 2003). Altas variações nos parâmetros meteorológicos exigem um sistema de observação constante da alta troposfera, de modo a detectar e diagnosticar fenômenos troposféricos intensos, como fortes tempestades, granizos, frentes de rajadas e ocorrência de tornados. Uma vez que o lançamento de radiossondas em intervalos de poucas horas não é recomendado devido ao seu custo elevado, a quantificação de água precipitável pode ser obtida através de rastreios GNSS, os quais não são afetados pela presença de nuvens e apresentam alta resolução temporal (Li *et al.*, 2015). A sua resolução espacial está intrinsecamente ligada à cobertura de estações de rastreio. Porém tal metodologia ainda é subutilizada no Brasil, tendo iniciado nos anos 2000, pelos trabalhos de Sapucci (2001). Esforços estão sendo realizados em parceria com diversas instituições, sob gerência do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), que continuamente expandem os estudos da troposfera e aperfeiçoam modelos numéricos a partir da assimilação de dados GNSS e de outras fontes (GOUVEIA, 2013). Além disso, têm-se os trabalhos de Oliveira Jr (2013), nos quais a variabilidade espacial da componente úmida do atraso troposférico foi estudada por meio

do gradiente horizontal troposférico pela primeira vez no Brasil. Tais investigações são importantes considerando-se a grande extensão do território brasileiro e suas diferenças climatológicas.

Diferentemente dos sensores imageadores, que fornecem dados *raster* do campo contínuo do vapor d'água, estações GNSS fornecem estimativas PWV pontuais, o que torna necessária a aplicação de métodos de interpolação para estudar a dinâmica espacial da variável em uma determinada região. Nesse sentido, a interpolação espacial aparece como uma ferramenta ideal para auxiliar as análises e chegar nos resultados e conclusões acerca do evento. Em estudos que levam em consideração aspectos geográficos, esta técnica permite a estimativa de valores de um determinado fenômeno em locais onde a variável não foi mensurada. A popularidade destas técnicas ascendeu após os avanços computacionais das últimas décadas que permitiram suas aplicações de modo rápido e eficiente. Este conceito também pode ser encontrado na bibliografia como “Análise Espacial de Superfícies”, onde um clássico exemplo é Druck *et. al.* (2004). Quando a técnica de interpolação considera a modelagem da flutuação estatística do conjunto de dados espaciais, denomina-se interpolação geoespacial (ou krigagem), sendo uma técnica avançada que, diferentemente das demais, não se restringe a apenas atribuir pesos as distâncias e medidas, mas sim considera a variabilidade do conjunto de dados, a análise estrutural da correlação espacial entre as observações e a validação do modelo (YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

O presente trabalho emprega a técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) para estimativas de PWV na região da Serra do Mar Paranaense. Como esta região não possui cobertura de estações GNSS e apresenta alta incidência de nuvens, o objetivo é averiguar a correlação de estimativas PWV de seis estações GNSS na região e em seu entorno, de modo a viabilizar estimativas da umidade por meio de interpolações espaciais. Neste sentido, a hipótese científica abordada no trabalho é: explorando o fato de que os sinais das estações GNSS localizadas na Serra do Mar e em seu entorno sofrem similares efeitos troposféricos, técnicas geoestatísticas aplicadas as estimativas GNSS de vapor d'água podem fornecer um geo-campo dessa variável, conduzindo a análises de dinâmicas de massas de ar locais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a correlação espacial do vapor d'água atmosférico por meio de estimativas GNSS na Serra do Mar paranaense, de modo a viabilizar a detecção de fenômenos atmosféricos sobre o local.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar a aplicação IBGE-PPP para estimativas PWV e validar os resultados;
- b) Analisar a correlação e homogeneidade de dados PWV obtidos por 6 diferentes estações GNSS instaladas na região de estudo;
- c) Investigar diferentes técnicas de interpolação espacial para obter o geo-campo da variável PWV sobre a região de estudo e validar os resultados;
- d) Verificar a relação entre a passagem de frentes sobre a região de estudo e os padrões nas séries temporais do PWV-GNSS.

1.2 JUSTIFICATIVA

A região da Serra do Mar paranaense sempre foi considerada um difícil obstáculo a ser transposto entre o litoral e o planalto do estado, sendo seu histórico marcado inicialmente pela abertura de estradas carroçáveis a partir de 1873 (ITCG, 2019). Com o aumento de tráfego entre o litoral e as demais regiões do estado, os municípios compreendidos pelos limites da Serra do Mar passaram a se desenvolver economicamente, e a região passou a ser objeto de estudo por parte de instituições governamentais e entidades de pesquisa. As principais preocupações com a Serra do Mar sempre foram sua situação físico-ambiental e sua regularização fundiária, fatos que exigem políticas exigentes de conservação e ocupação territorial (IPARDES, 1991), que caso não sejam mantidos podem desencadear processos de degradação irreversíveis. Por este motivo a região é alvo de monitoramento contínuo de sua biodiversidade e de seu clima, características que, juntamente com seu relevo,

a fazem diferenciada das demais regiões do estado. Exemplos de planos direcionados ao monitoramento e conservação da região podem ser encontrados em ITCG (2019), IBAMA (1995), Blum *et. al.* (2011) e Cunha *et. al.* (2010).

Segundo a classificação de Koeppen-Geiger (versões de 1918-1936), a costa paranaense compreende dois tipos climáticos da classe subtropical úmido mesotérmico: Cfa - com verões quentes, baixa ocorrência de geadas e precipitações regulares em todos os meses do ano; e Cfb - com verão fresco, precipitações regulares o ano todo e geadas severas. A umidade dos ventos do mar, segundo IPARDES (1991), se condensa na vertente da serra, formando neblina alta, entre 1.000 m e 1.200 m de altitude e a dinâmica de diversas massas de ar atuantes no local fazem com que a região apresente significativa variação térmica e elevados volumes de chuva continuamente. De forma geral, a área é considerada climatologicamente instável com altos índices de precipitação e umidade relativa do ar, fato que pode ocasionar riscos críticos caso sua cobertura vegetal venha a ser degradada, como deslizamentos e erosões. O monitoramento climático da Serra do Mar deve ser uma atividade frequente, uma vez que o local possui significativa importância não apenas ambiental, mas também socioeconômica. Graves alterações na paisagem local e consequentes mudanças climáticas podem impactar em mais de 307 espécies de fauna e ainda atividades econômicas tais como mineração, exportação, aquicultura, agricultura, entre diversas outras (ITCG, 2019).

Os aspectos climáticos de uma determinada região possuem relação com o ciclo hidrológico (ANA, 2020). Sendo o modo natural de circulação da água no sistema terrestre, este ciclo possui forte influência sobre a climatologia local, determinando níveis de seca ou umidade e transportando a água em seus estados líquido, gasoso e sólido. Mesmo sendo um ciclo, para fins práticos, pode-se analisar seu início a partir dos oceanos, onde as altas temperaturas tendem a evaporar as águas superficiais, transportando este vapor segundo os deslocamentos das dinâmicas de ar sobre os continentes. Parte desse vapor é condensado em nuvens na troposfera, que são também transportados ao continente, onde ocorre a precipitação dando sequência ao ciclo hidrológico (BARREY e CHORLEY, 2013). Este fenômeno é considerado essencial para manutenção de massas d'água, equilíbrio térmico e condições para o desenvolvimento da vida.

A preocupação da sociedade sobre o ciclo hidrológico pode ser vista em diversos projetos, leis e esforços que tem como objetivo preservá-lo, compreendê-lo

e prevê-lo. Exemplos dessas atividades no Brasil são a Lei 12.651/2012 (Código Florestal) que exige a preservação de massas d'água, a Lei 1.413/1975 que trata de cuidados para a poluição atmosférica; diversos trabalhos de zoneamentos climáticos, geralmente realizados pela EMBRAPA (EMBRAPA, 2020), INPE (INPE, 2020) e outros órgãos de apoio ao desenvolvimento nacional; e pesquisas e desenvolvimentos de metodologias para elaboração de modelos numéricos de tempo e prevenção de desastres naturais. Todas estas ações visam a implementação de políticas públicas de prevenção e desenvolvimento, apoiando diversos ramos de negócios e pesquisas.

O IPCC (Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas) prevê que na metade do século XXI os efeitos de mudanças climáticas se agravarão (IPCC, 2018), cobrando da sociedade ações relacionadas a vulnerabilidade, impactos e adaptações. Em território brasileiro, a ONU (Organização das Nações Unidas) estima que que desastres naturais ocasionados por questões climáticas custam ao país R\$ 800 mil (ONU, 2017), e a CNM (Confederação Nacional de Municípios) mostra que entre 2008 e 2018 os decretos de calamidade pública aumentaram em 35,42% (CNM, 2018), sendo o sul é região que sofre com mais desastres relacionados a chuva e o Nordeste com mais desastres relacionados com a seca.

Estudos do Ministério do Meio Ambiente (MMA) brasileiro indicam previsão de perdas econômicas por volta de R\$ 14 bilhões até 2070, em atividades agrícolas devido a condições hídricas (BRASIL, 2016 *apud* MMA, 2017). Embrapa (2016) prevê aumento dos riscos climáticos até 2040, reforçados pelo relatório da FAO (FAO, 2016) que estima 44% de perdas devido à seca e 39% de perdas devido a enchentes.

Diversos financiamentos são regularmente realizados em favor do Brasil para fins de estudos climáticos. Por exemplo, a *Green Climate Fund* já aplicou até a data deste estudo US\$ 2,2 bilhões para pesquisas relacionadas ao tema em território brasileiro, enquanto a *Global Environment Facility* já destinou US\$ 550,29 bilhões. As agências implementadoras dos financiamentos são em sua maioria a própria ONU e o Banco Mundial, e são diversos os atores públicos e privados responsáveis por tais estudos, divididos em Poderes Públicos, ONGs, universidades, empresas e institutos de pesquisa (VITAE CIVILIS, 2008). De fato, isso prova que a preocupação com o clima no país vem se tornando cada vez mais forte, exigindo que metodologias eficientes, práticas e inovadoras sejam desenvolvidas para apoiar o segmento.

O controle das variações em quantidade de vapor úmido atmosférico é um dos principais fatores que devem ser considerados nos planos de trabalho, pois reflete diversas características, não apenas da atmosfera, mas também da própria superfície terrestre ou dos objetos presentes nela (casos como estudos da evaporação de água do solo ou a evapotranspiração de plantas). A começar pela dinâmica espaço-temporal do PWV, esta é uma análise ainda escassa no Brasil, que pode vir a apresentar resultados importantes sobre o sistema hidrológico no país.

Conforme explica Sapucci (2001), as técnicas convencionais de levantamento e monitoramento PWV possuem limitações devido a seus altos custos (no caso das radiossondas) ou alta sensibilidade a nuvens e variações de temperatura (radiômetros e demais sensores espectrais). Em 2001, esta obra introduziu ao Brasil a aplicação de rastreios GNSS para fins do monitoramento do vapor d'água, considerada uma técnica eficiente devido a sua alta resolução temporal e baixo custo, viabilizando o monitoramento desta variável. Entretanto, sua resolução espacial é limitada ao número de estações distribuídas pela superfície. A rede geodésica de estações GNSS do Brasil ainda não é densa o suficiente para aplicações de monitoramento atmosférico em todo o território nacional, o que exige da comunidade científica o desenvolvimento de técnicas que contornem esse problema.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos principais temas envolvidos nesta pesquisa. No que se refere ao posicionamento GNSS, ao atraso zenital neutrosférico e as estimativas do PWV por técnica GNSS-MET. No que se refere às análises estatísticas, a interpolação espacial, a inferência estatística, a análise por componentes principais e o teste de homogeneidade são também aqui tratados.

2.1 POSICIONAMENTO PELO GNSS

A geodésia é uma ciência que sempre teve como principais focos a mensuração e o mapeamento da superfície terrestre, objetivando diversos fins que partem do estabelecimento de redes geodésicas de referência até aplicações avançadas em estudos geodinâmicos e espaciais. A ascensão da geodésia moderna ocorreu juntamente com o surgimento da era espacial, onde as atividades de posicionamento e monitoramento passaram a ser realizadas por técnicas de sensoriamento remoto, empregando-se dados emitidos por estações laser, satélites artificiais ou fontes de rádio intergalácticas (SEEBER, 2003). Atualmente, após esta revolução tecnológica, os objetivos da geodésia focam na variação temporal de variáveis geométricas e físicas, em sua maioria relacionadas ao campo gravitacional terrestre.

Dentre as técnicas atuais da geodésia espacial, destaca-se o GNSS (*Global Navigation Satellite System*, ou Sistemas Globais de Navegação por Satélites), por ser a fonte de obtenção de dados mais usual. Este sistema, reconhecido internacionalmente em 1991 durante a 10ª conferência de Navegação Aérea (KRUEGER, 2006, *apud* Euriques, 2019), se refere ao conjunto de constelações de satélites desenvolvidas para prover posicionamento e navegação através de sinais de rádio. Suas aplicações variam para diversos fins civis e militares, como trabalhos de regularização de terras, modelagem de órbitas de corpos celestes, monitoramento geodinâmico, delimitação de áreas de cultivo e exploração, estudos atmosféricos, navegação automobilística, entre outros. Exemplos do uso do GNSS para atividades científicas e profissionais podem ser encontrados em Wang *et. al.* (2005), Szafranek, *et. al.* (2013), Kuga & Baroni (2012), Badescu, *et. al.* (2012) e Pinto *et. al.* (2013).

Atualmente, o GNSS é composto por quatro constelações de satélites distintos, e por seus sistemas complementares de aumento, como o SBAS (*Ground Based Augmentation System*) e o GBAS (*Ground Based Augmentation System*). Entretanto, devido a completude, os seguintes sistemas são os mais utilizados:

- NAVSTAR-GPS: Sigla para *Navigation Satellite with Time and Ranging - Global Positioning System*. É a constelação estadunidense, operacional desde 1994, atualmente com 31 satélites em órbita.
- ГЛОНАСС (GLONASS): Sigla para Глобальная навигационная спутниковая система – *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*. É a constelação russa iniciada em 1995, contando com 24 satélites operacionais.

Outros sistemas de navegação existentes são GALILEO, COMPASS/BEIDOU-2, IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) e QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), cujos domínios pertencem, respectivamente, a União Européia, China, Índia e Japão. Mais informações sobre estes sistemas podem ser encontradas em Hofmann-Wellenhof (2008) e Hegarty e Kaplan (2006)

2.1.1 Princípio de funcionamento

Os sistemas GNSS se focam em obter a distância entre as antenas do satélite e do receptor, a partir dos registros de horários em que o sinal foi emitido e recebido, teoricamente, fazendo uso da relação apresentada pela equação 2.1 (SEEBER, 2003). Na prática, a teoria de medição é afetada por fontes de erros existentes no processo, sendo as propriedades atmosféricas, os erros relacionados ao tempo de propagação e os efeitos geodinâmicos os principais fatores a serem considerados.

$$R = c * \Delta t \quad , \quad (2.1)$$

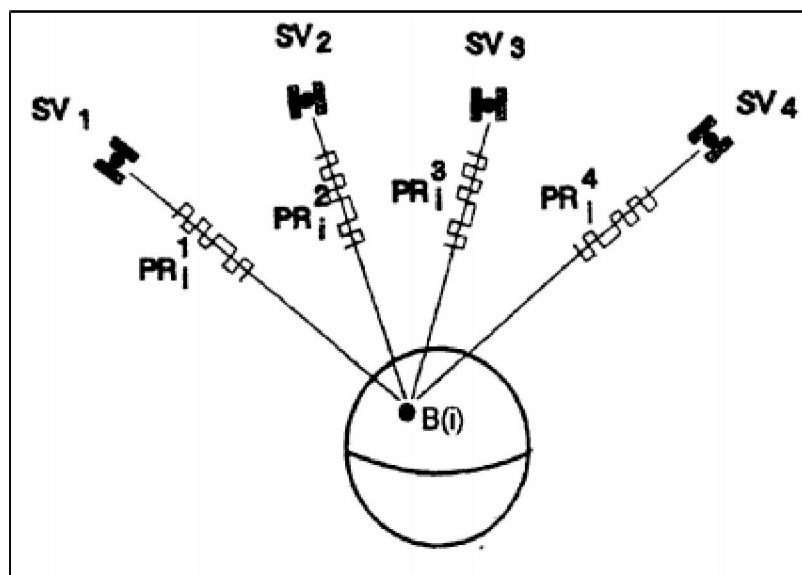
sendo:

R a distância geométrica entre os centros de fase das antenas do satélite e do receptor, em metros;

c o módulo de velocidade de propagação da luz no vácuo, cuja constante adotada pela União Astronômica Internacional (UAI) é de $299.792.456 \text{ m.s}^{-2}$ e Δt a diferença de tempo entre a emissão do sinal pelo satélite e recepção pelo receptor, em segundos.

Segundo Monico (2008), o princípio básico de funcionamento dos sistemas GNSS se baseia na observação simultânea de no mínimo quatro satélites (Figura 01) para um mesmo receptor, em quaisquer condições meteorológicas e em qualquer local sobre a superfície terrestre ou próximo a ela. O número essencial de 4 distâncias observadas (PR_i^n) se dá devido ao número de variáveis a serem determinadas como finalidade, ou seja, as coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) do ponto ocupado pelo receptor e ainda o erro de tempo devido ao não sincronismo dos relógios. Assim, tomando como base a teoria do ajustamento de observações (GEMAEL, 1994), sendo quatro variáveis a serem determinadas, quatro observações são suficientes para determinar a posição do ponto, porém pelo menos cinco observações permitirão um ajustamento com abundância de dados para análise da qualidade do trabalho, neste caso, cinco satélites observados.

FIGURA 01 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO GNSS



FONTE: Seeber (2003)

Na prática, as observáveis GNSS, que teoricamente deveriam se relacionar apenas com as variáveis apresentadas na Equação 2.1, são afetadas por fontes de erros que impactam consideravelmente a observação da distância geométrica.

Tratamentos específicos de tais erros permitem que a acurácia do posicionamento seja melhorada, levando a uma melhor solução no posicionamento e navegação. As técnicas de processamento serão mais bem detalhadas na seção 2.1.3.

Devido ao efeito dos erros atuantes nas observáveis GNSS, tem-se que as distâncias medidas entre as antenas (satélites e receptor) sejam, na prática, pseudodistâncias (KRUEGER, 1996), ou seja, distâncias geométricas afetadas por erros sistemáticos e aleatórios. Quando esta grandeza é obtida pela observação do código, se dá conforme a Equação 2.2. Quando obtida pela observação de fase das ondas portadoras, a Equação 2.2 recebe mais termos, ficando como a Equação 2.3, devido a presença de ambiguidades que devem ser solucionadas (determinação do número inteiro de ciclos contados durante a propagação do sinal). Ressalta-se que tais equações são empregadas quando não há diferenciações ou combinações lineares entre as observáveis, caso contrário modelos mais complexos devem ser aplicados (MONICO, 2008). Detalhes sobre a estrutura dos sinais e dos sistemas GNSS podem ser consultados em Monico (2008), Krueger (1996), Seeber (2003), Parkinson e Spike Jr (1997) e UNAVCO (2018).

$$PR_i^n = PR_i^n + c * (dt_i - dt^n) + I_i^n + T_i^n + dm_i^n + \varepsilon_i^n \quad ; \quad (2.2)$$

$$PD_i^n = D_i^n + c * (dt_i - dt^n) + I_i^n + T_i^n + \lambda * [\emptyset^n - \emptyset_i + \Omega_i^n] + dm_i^n + \varepsilon_i^n \quad , \quad (2.3)$$

onde:

PD_i^n é a pseudodistância entre o satélite n e o receptor i , em metros;

D_i^n é a distância geométrica entre o satélite n e o receptor i , em metros;

dt_i é o erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS para o instante da observação, em segundos;

dt^n é o erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS para o instante de emissão, em segundos;

I_i^n e T_i^n são as refrações ionosférica e troposférica, respectivamente, em metros;

λ é o comprimento da onda portadora, em metros;

ϕ^n e ϕ_i são as fases da onda portadora geradas no satélite e no receptor, respectivamente;

Ω_i^n é a ambigüidade na portadora observada;

dm_i^n é a magnitude do efeito de multicaminho, em metros; e

ε_i^n são outros erros existentes.

2.1.2 Fontes de erros

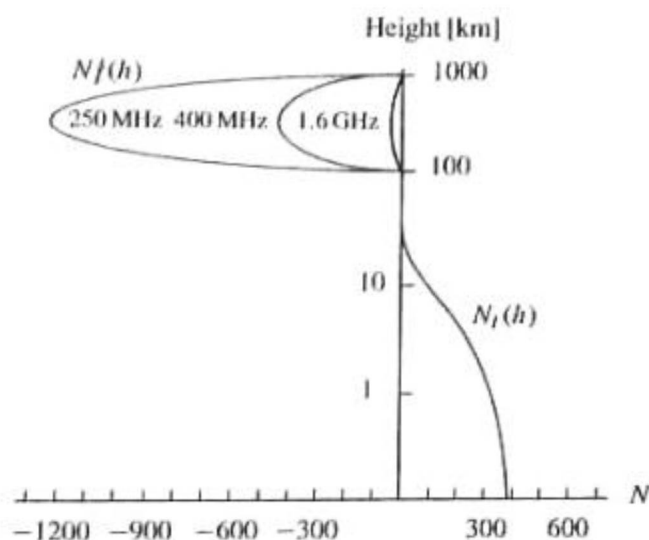
A compreensão das fontes de erros atuantes sobre as observáveis GNSS se torna essencial quando se deseja obter resultados de precisão milimétrica ou melhor. Dentre elas, os erros relacionados a medição do tempo de propagação e a passagem do sinal pela atmosfera são os de maior impacto na solução final. Uma vez que a determinação da distância é dependente do tempo de propagação do sinal, os erros relacionados aos relógios dos satélites e receptor afetam a qualidade dos rastreios GNSS em uma taxa de 30 cm a cada 1 ns, segundo Mansur (2017). Por este motivo os satélites das constelações possuem relógios atômicos de alta precisão (KRUEGER, 1996) que possuem a capacidade de medir o tempo com acurácia de nanossegundos. Os relógios dos receptores, por sua vez, por possuírem qualidade muito inferior aos dos satélites acabam por não medir o tempo com precisão suficiente, inserindo então um novo parâmetro no modelo de posicionamento: o erro do relógio do receptor. Por este motivo se dá a necessidade de quatro satélites observados. Outro fato importante, que também exige a determinação deste parâmetro, é devido as diferenças nos Sistema de Tempo e ainda pelo efeito relativístico que afeta a propagação do sinal. MANSUR (2017) e SEEBER (2003) descrevem, com maiores detalhes, o processo de determinação dos erros associados aos relógios do satélite e do receptor.

Outros dois erros importantes que afetam o cálculo das distâncias são aqueles devido às interferências na propagação das ondas eletromagnéticas, ocasionadas pela variação da refratividade das camadas que compõem a atmosfera terrestre (GOUVEIA, 2019). Tais efeitos são distinguidos entre refração, atenuação e cintilação, e serão mais bem explicados na seção 2.2. A ionização dos compostos da camada ionosférica, compreendida entre 50 km a mais de 1000 km acima da

superfície terrestre, ocorre devido ao índice de radiação solar incidente, alterando constantemente o conteúdo total de elétrons (*Total Electron Contents* - TEC) ali existente (GEMAEL e ANDRADE, 2003). Quanto mais perturbada tal camada, maiores são os efeitos ocasionados por ela, e assim pior a qualidade de posicionamento. Como o efeito incidente varia com a frequência das ondas, tem-se que diferentes portadoras emitidas pelos satélites sofrem diferentes atrasos, o que permite que, a partir da combinação linear de observações simultâneas de duas portadoras, tal efeito seja minimizado. Por este motivo, receptores de dupla-frequência são os mais recomendados, uma vez que além de fornecerem melhores resultados permitem uma redução no tempo de convergência das soluções das ambiguidades, reduzindo o tempo de rastreamento. No caso dos sinais de ondas emitidos pelos satélites GNSS, suas frequências variam de aproximadamente 1,2 GHz (ondas portadoras L2 e L5) a 1,6 GHz (onda portadora L1); ou em comprimento de 19 cm (onda portadora L1) a 24 e 25,5 cm (ondas portadoras L2 e L5).

Gouveia (2019) define um conceito recente, apresentando uma camada denominada Neutrosfera (atmosfera neutra) como a camada atmosférica eletricamente neutra, ou seja, livre de conteúdo de elétrons. Esta camada engloba a própria troposfera e a estratosfera, com altura média de 50 km a partir da superfície terrestre. A Neutrosfera também ocasiona os efeitos supracitados devido aos gases e partículas suspensas presentes nesta camada. A magnitude deste efeito é inversamente proporcional a altitude do local de rastreamento, uma vez que quanto menor a altitude, maior a camada neutrosférica sobre a região. Tem-se também que os sinais oriundos de satélites de menor elevação, ou seja, aqueles mais próximos ao horizonte, sofrem maiores interferências. Por este motivo, geralmente adotam-se apenas observações maiores que 10° ou 15° no ângulo de elevação (KRUEGER, 1996). O tratamento dos efeitos neutrosféricos é realizado empregando-se modelos matemáticos e funções de mapeamento (MONICO, 2008). Segundo Seeber (2003) o comportamento do índice de refração atmosférico (N) para diferentes comprimentos de ondas em função da altitude na camada atmosférica pode ser visualizado na Figura 02.

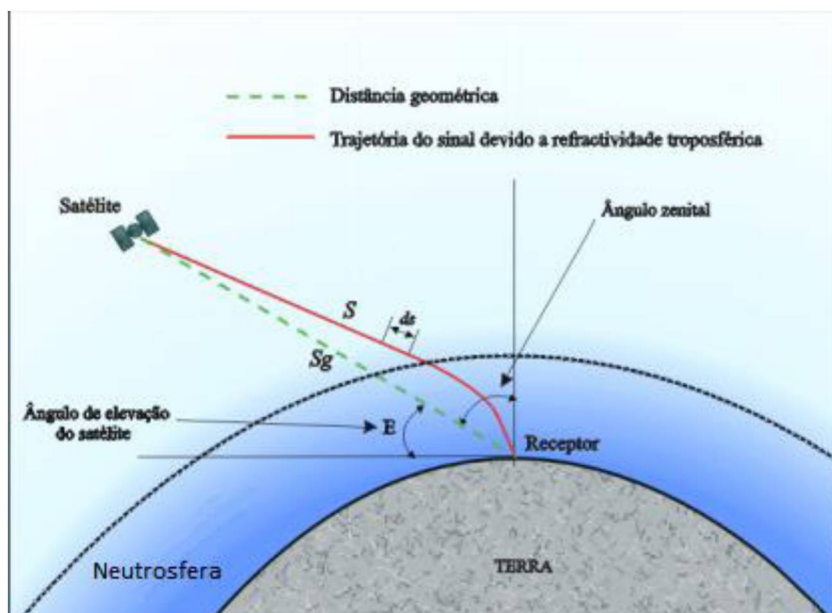
FIGURA 02 – COMPORTAMENTO DO ÍNDICE DE REFRAATIVIDADE



FONTE: Seeber (2003)

Considerando-se então a refração atmosférica sobre a onda eletromagnética GNSS, pode-se dizer que a distância calculada sofre um desvio em relação a distância geométrica, conforme é mostrado na Figura 03.

FIGURA 03 – ILUSTRAÇÃO DA CURVATURA DOS SINAIS GNSS



FONTE: Adaptado de Sapucci (2001)

Ainda sobre a propagação do sinal, deve ser considerado também o efeito de multicaminho, definido como a reflexão de sinais por objetos próximos as antenas. A presença desses sinais acarreta resíduos nos dados GNSS, que são de complexa

modelagem e, conforme Seeber (2003) esclarece, podem chegar a decímetros pelas observações de fase a vários metros pelo código. A melhor maneira de evitar tais erros é utilizando materiais atenuadores que bloqueiam a recepção destes sinais pela antena, como o desenvolvido por Viski (2012). Maiores detalhes sobre o efeito de multicaminho podem ser encontrados em Euriques (2019), que mostra inclusive como aproveitar este efeito para monitoramento de estruturas e umidade do solo.

Erros referentes a órbita descrita pelos satélites também são importantes em levantamentos de precisão, uma vez que a órbita planejada para os mesmos é direta e constantemente afetada por efeitos físicos no espaço (perturbações gravitacionais terrestres, solares e lunares, força de pressão da radiação solar e força de arrasto), além da necessidade da melhor estimativa de tempo possível. Desta maneira, as informações de órbitas e relógios (ou efemérides) transmitidas pelos satélites, e usadas pelo processamento para cálculo da posição do usuário, possuem acurácia consideravelmente degradada. Monico (2008) deixa claro que, por este motivo, os segmentos de controle fazem monitoramentos constantes das órbitas reais, para certificação do trajeto. Existem ainda, conforme apresentado por IGS (2020), centros de processamento vinculados ao Serviço Internacional de GNSS (ou *International GNSS Service* - IGS) que utilizam os dados de estações de rastreamento contínuo ao redor do globo para efetuar modelagens dos parâmetros de correção de órbita e relógio dos satélites. Posteriormente, geram arquivos de posição de órbita mais precisos, denominados de efemérides, e disponibilizam ao público para obtenção de resultados mais acurados. Na Tabela 01 são apresentados os diferentes tipos de efemérides geradas, o tempo associado para sua disponibilização e a precisão relacionada a tais posições. Desta maneira, por exemplo, caso o usuário deseje coordenadas com a melhor precisão possível, deve aguardar a disponibilização das efemérides finais para realizar o processamento.

TABELA 01 – INFORMAÇÕES DE DISPONIBILIZAÇÃO DE EFEMÉRIDES

Tipo		Acurácia	Latência	Atualização	Intervalo de Amostra
Efemérides Transmitidas	Orbitas	~100 cm	tempo real	--	diariamente
	Relógios	~5 ns EMQ ~2,5 ns EMQ			
Efemérides Ultra-rápidas (pseudo preditas)	Orbitas	~5 cm	tempo real	as 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógios	~ 3 ns EMQ ~1,5 ns Desv. Padrão			
Efemérides Ultra-rápidas (pseudo observadas)	Orbitas	~3 cm	3 - 9 horas	as 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógios	~ 150 ps EMQ ~ 50 ps Desv. Padrão			
Efemérides Rápidas	Orbitas	~2.5 cm	17 - 41 horas	as 17 UTC diariamente	15 min
	Relógios	~75 ps EMQ ~25 os Desv. Padrão			5 min
Efemérides Finais	Orbitas	~2.5 cm	12 - 18 dias	Toda quinta-feira	15 min
	Relógios	~75 ps EMQ ~20 ps Desv. Padrão			Sat.: 30s 5 min

FONTE: Adaptado de IGS (2020)

Demais erros de menor magnitude não serão detalhados neste trabalho, o que não minimiza a importância de suas correções para posicionamento de alta precisão. Caso o leitor tenha interesse em obter mais informações, pode consultar Gemael e Andrade (2003), Monico (2008) ou Amagua (2018). Entretanto, o resumo de todos os erros atuantes e suas fontes de origem estão indicados na Tabela 02.

TABELA 02 – PRINCIPAIS ERROS NO POSICIONAMENTO GNSS

FONTE	ERRO	TIPO
Satélite	Erro na órbita	Posição
	Efeitos relativísticos	Estabilidade do relógio
	Erros instrumentais	Sincronização do relógio
		Variações do centro de fase
Sinal	Radiação solar	Pressão por radiação solar
	Refração atmosférica	Refração troposférica
		Refração ionosférica
	Multi-caminho	
Receptor / Antena	Erros instrumentais	Sincronização do relógio
		Variações do centro de fase
		Propagação entre canais
Meio	Geodinâmica	Movimentos Tectônicos
	Cargas	Carga da atmosfera
		Carga do oceano
		Carga hidrológica
	Marés	Marés atmosféricas
		Marés oceânicas
		Marés terrestres

FONTE: Amagua (2018)

2.1.3 Posicionamento por Ponto Preciso

Durante o tempo decorrido desde que o primeiro satélite GPS foi lançado (em fevereiro de 1978), diferentes métodos de processamento foram desenvolvidos para viabilizar e facilitar as atividades técnico-científicas baseadas nos sistemas de navegação. Todas as metodologias visam minimizar os erros atuantes nas observáveis GNSS e aumentar a precisão do posicionamento obtido, empregando-se modelagens matemáticas, combinações lineares e técnicas de ajustamento (LAROCCA, 2000). Estes métodos de posicionamento são classificados principalmente em duas categorias: pós-processado ou em tempo real. Enquanto o primeiro fornece as coordenadas precisas por processamento realizado após as

atividades de coleta de dados, o segundo permite a obtenção dessas coordenadas durante a execução do levantamento.

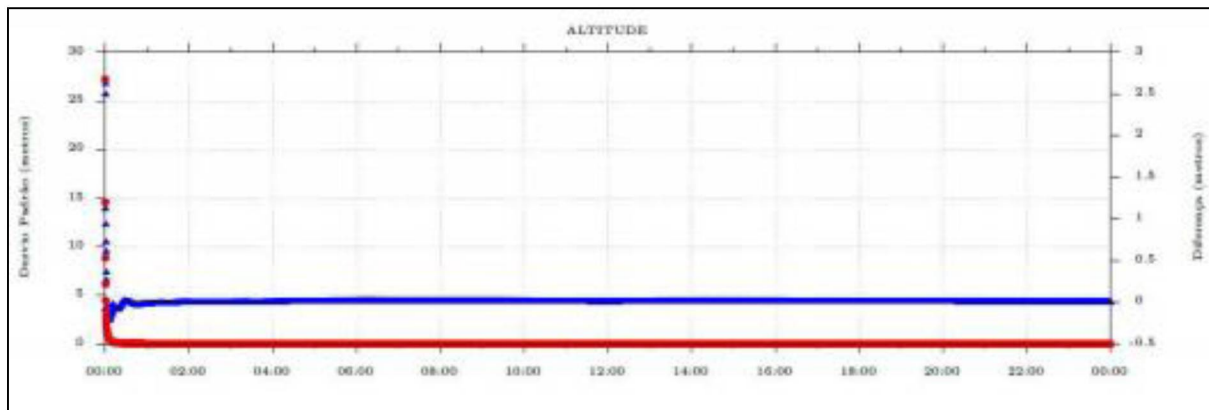
De forma geral, todas as técnicas de processamento envolvem a modelagem dos erros atuantes nas observáveis de satélites no momento do rastreo, de modo a aplicar correções aos dados obtidos pelo receptor posicionado no ponto de interesse. Krueger (1996) explica as principais técnicas de processamento GNSS existentes:

- Posicionamento Relativo: Método pós-processado que utiliza combinações lineares entre duas ou mais estações GNSS, doravante denominadas bases - com coordenadas conhecidas - e itinerantes - com coordenadas a serem determinadas. Os erros relacionados aos satélites são minimizados na estação itinerante a partir da diferenciação entre as suas observáveis e as observáveis da base.
- PPP: Sigla para Posicionamento por Ponto Preciso. Esta técnica dispensa o uso de um receptor base, podendo utilizar apenas um receptor itinerante posicionado sobre um ponto de interesse, ou deslocando-se sobre um trajeto. Os erros atuantes nas observáveis GNSS, neste caso, serão corrigidos a partir de modelos desenvolvidos empiricamente, sendo função da localização geográfica e da época do rastreo realizado.
- DGNS (Differential GNSS): Nomenclatura atribuída aos métodos diferenciais para posicionamento. Um exemplo muito conhecido desta técnica é o RTK (Real Time Kinematic) popular atualmente pela facilidade de obtenção de posicionamento de precisão em tempo real.

Caso o leitor tenha interesse em obter maiores detalhes sobre os métodos atuais de posicionamento GNSS, pode consultar Monico (2008) e Seeber (2003).

A técnica PPP é vista atualmente como detentora do melhor custo-benefício para obtenção de resultados de posicionamento com precisão de até 5 cm. A única desvantagem do método é devido a necessidade de pelo menos 30 min de rastreo para solucionar os efeitos ocasionados pela correlação entre o relógio do receptor, a troposfera e a altimetria (MONICO, 2008). Na Figura 04 é apresentado um exemplo de convergência de desvio padrão e diferença relativa para um posicionamento PPP. Percebe-se que as primeiras observações possuem pior qualidade, porém sua convergência para resultados melhores vai se estabelecendo conforme as iterações em cada época de dado, estabilizando-se após 30 min de rastreo, aproximadamente.

FIGURA 04 – EXEMPLO DE CONVERGÊNCIA PPP



FONTE: IBGE (2017)

Nesta técnica, o uso de receptores dupla-frequência é um grande diferencial, permitindo que o erro de refração ionosférica seja praticamente eliminado pela combinação das ondas portadoras L1 e L2, denominada combinação iono-livre (CAMARGO, 1999). Esta combinação, associada a aplicação das efemérides precisas já elimina a maior parcela de contribuição nos erros envolvidos nas medições.

Os programas PPP, atualmente, aplicam as correções para quase todos os erros envolvidos nas medidas de pseudodistâncias. Até onde se sabe, ao momento da presente publicação, os únicos erros ainda carentes de modelo na maioria das aplicações são o de carga hidrológica e carga atmosférica, que recentemente passaram a ser fortemente estudados na comunidade científica - Amagua (2018) apresenta um exemplo de estudo de carga hidrológica em território brasileiro. Os modelos empregados são originados pelo tratamento de observações geofísicas, atmosféricas e orbitais, e são desenvolvidos por centros de processamento especializados na análise e modelagem GNSS. As efemérides, modelos e transformações mais importantes até a presente data, são fornecidos por 34 centros de processamento vinculados ao IGS (*International GNSS Service* - Serviço GNSS Internacional), como por exemplo o BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*) - Agência de Cartografia e Geodésia do governo federal alemão, NGS (*National Geodetic Survey*) - Serviço Geodésico Nacional, vinculado ao NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica) e o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) - Laboratório de Propulsão a Jato, vinculado a NASA (Administração Nacional Aeronáutica e do

Espaço). A lista dos demais centros pode ser verificada no endereço eletrônico <http://www.igs.org/about/analysis-centers>.

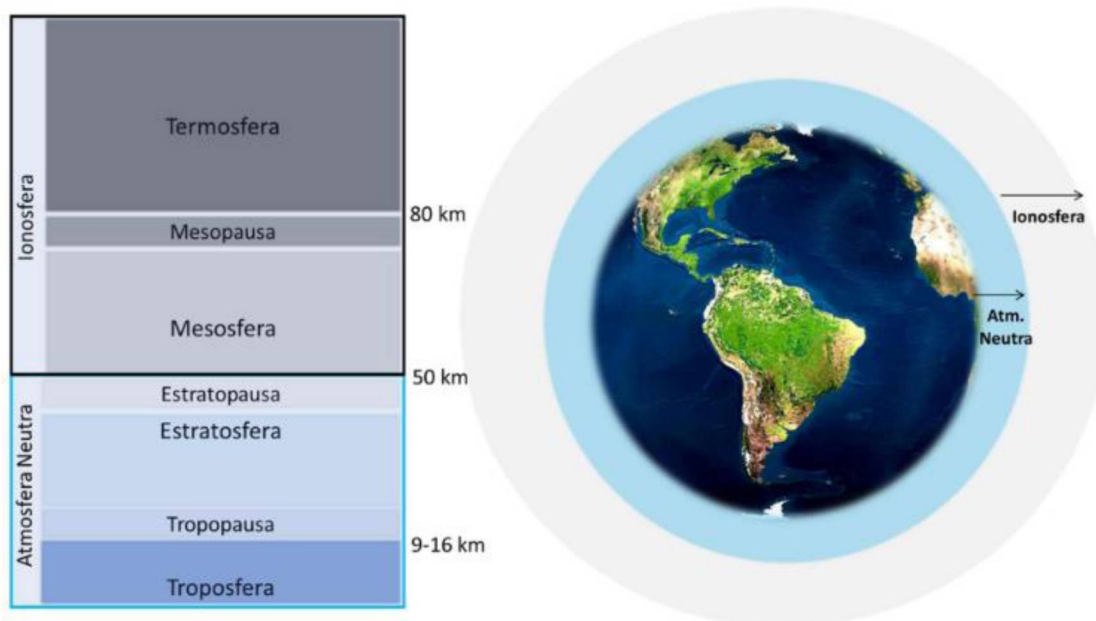
Cada centro de processamento do IGS mantém sua própria metodologia de processamento e análise de dados GNSS, gerando algoritmos de modelagens a serem aplicados nas correções das medidas observadas. Exemplos de produtos que podem ser usados por programas PPP são modelos de maré terrestre e movimento do polo terrestre do IERS (*International Earth Rotation Service*), modelo ionosférico global do CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), efemérides precisas do JPL, entre outros. Estas modelagens, quando aplicadas em conjunto, fornecem posicionamento de precisão e estimativas do atraso zenital e do conteúdo total de elétrons.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) possui um serviço próprio para posicionamento PPP, denominado PPP-IBGE, gratuito e online. Este aplicativo é fruto de uma parceria entre o IBGE e o CGS/NRCAN, e aproveita parâmetros de correção e algoritmos disponibilizados pelo aplicativo canadense CSRS-PPP. O PPP-IBGE processa apenas dados com data de rastreo após 25 de fevereiro de 2005, devido a data de adoção oficial do sistema de referência SIRGAS2000 para o Brasil. Como a aplicação resulta em coordenadas vinculadas a este sistema, realização de sistemas de referência anteriores não são considerados. Os métodos de processamento empregados, incluindo ainda os modelos de correções do PPP-IBGE são apresentados em IBGE (2017).

2.2 MODELOS TROPOSFÉRICOS E O ATRASO ZENITAL

O funcionamento do GNSS leva em consideração a propagação de sinais de rádio na velocidade da luz, partindo da antena do satélite em órbita até o momento da chegada do sinal à antena do usuário. As ondas emitidas sofrem efeitos ao cruzar as camadas atmosféricas, ocasionados pelos diferentes índices de refração ao longo do trajeto. Na Figura 05 são apresentadas as divisões atmosféricas que compreendem tanto a ionosfera quanto a neutrosfera (ou atmosfera neutra, vide seção 2.1.2), com referência de suas respectivas alturas médias em relação a superfície terrestre.

FIGURA 05 – CAMADAS ATMOSFÉRICAS TERRESTRES



Fonte: GOUVEIA, 2019, apud TEUNISSEN E MONTENBRUCK, 2017

Tanto a ionosfera quanto a neutrosfera ocasionam os mesmos efeitos sobre as ondas eletromagnéticas. Ao todo, três efeitos são observados, sendo (MONICO, 2008):

- Atenuação: refere-se à diminuição da potência do sinal da onda eletromagnética, devido ao conteúdo presente nas camadas;
- Cintilação: oscilação na amplitude das ondas, ocasionada por irregularidades e turbulência no índice de refração atmosférico; e
- Refração: efeito decorrente do atraso do sinal enquanto este cruza a atmosfera, ocasionado pela presença de gases e partículas sólidas no caso da troposfera, e conteúdo de elétrons livres presentes na ionosfera.

Os gases presentes na neutrosfera, e que ocasionam a refração, foram apresentados na seção 1 e, para fins práticos nas atividades de navegação, podem ser classificados em gases secos (ou hidrostáticos) e o vapor d'água, e possuem quase que total contribuição no atraso neutrosférico do sinal de satélite.

O atraso e a mudança de direção que a camada neutrosférica ocasiona sobre as ondas eletromagnéticas são causados pela variação do índice de refração atmosférico, que se dá em função de temperatura, pressão e umidade. Além disso, tal índice varia proporcionalmente a altitude do local de rastreamento, pois está diretamente

relacionado a coluna vertical da atmosfera, ou seja, quanto menor a altitude maior a coluna e consequentemente maior o atraso. Por isso, Sapucci (2005) explica que a relação entre o atraso neutrosférico e o índice de refração do ar é dado conforme equação 2.4, necessitando integrar o índice de refração N em função do trajeto percorrido pelo sinal (s) caso se deseja obter o valor de atraso zenital total (*Zenith Total Delay* - ZTD), em metros.

$$ZTD = 10^{-6} \int N \, ds \quad , \quad (2.4)$$

sendo N o índice de refração atmosférica; e

ds a representação de parte infinitesimal da trajetória percorrida pelo sinal.

O efeito de atraso neutrosférico é ocasionado pelas componentes hidrostática e úmida dos gases presentes na troposfera, permitindo então que o mesmo possa ser dividido em duas partes respectivas a estas, ou seja, atraso zenital hidrostático (*Zenith Hydrostatic Delay* - ZHD) e atraso zenital úmido (*Zenith Wet Delay* - ZWD). A magnitude de cada um destes efeitos é função da espessura da camada neutrosférica por onde a onda se propaga, que por sua vez é proporcional ao ângulo de elevação do satélite observado. Por este motivo, existe a necessidade de se efetuar correções aos valores em função deste ângulo, por meio de chamadas funções de mapeamento (MONICO, 2008), que reduzem o valor dos atrasos hidrostático e úmido do zênite a direção onde o sinal percorreu. O modelo genérico é apresentado na equação (2.5). Ressalta-se que tanto o ZTD, quanto o ZHD e ZWD são variáveis métricas, geralmente dadas em metros.

$$ZTD = ZHD * mh(E) + ZWD * mw(E) \quad , \quad (2.5)$$

sendo mh e mw as respectivas funções de mapeamento para as componentes hidrostática e úmida; e

E é o ângulo de elevação do sinal recebido.

2.2.1 Modelagem Troposférica Aplicada a Processamentos GNSS

Os efeitos do atraso neutrosférico em observáveis GNSS, como apresentado pela equação 2.5, podem ser modelados, quantificados e corrigidos, aumentando a eficiência do processamento e melhorando seus resultados. Essa metodologia inclui o uso de funções de mapeamento, com coeficientes previamente definidos ou ajustados, a partir de informações externas de temperatura, pressão e umidade. Marini (1972) apresenta a formulação geral para as funções de mapeamento (mf - equação 2.6), que tem como parâmetros de entrada o ângulo de observação do sinal do satélite (e) e os coeficientes a , b e c , determinados empiricamente por meio de dados atmosféricos.

$$mf(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}} \quad . \quad 2.6$$

Ao longo dos anos de aperfeiçoamento dos processamentos na geodésia espacial, muitas funções de mapeamento foram desenvolvidas, sendo as mais comuns atualmente *Niell Mapping Function* (NMF - Niell, 2001), *Vienna Mapping Function* (VMF – Boehm *et. al.*, 2006) e *Global Mapping Function* (GMF – Boehm *et. al.*, 2006). Cada função de mapeamento possui estrutura própria e diferentes coeficientes, estimados por diferentes métodos, envolvendo o uso de dados atmosféricos provenientes de radiossondas ou modelos de re-análise, como por exemplo o ERA-40 do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), explorado para determinação dos últimos modelos após o ano 2000, como explica Boehm *et. al.* (2006). Para resultados mais acurados no posicionamento, cada modelo possui uma função de mapeamento para a componente hidrostática e uma para a componente úmida. Exemplos mais clássicos - que atualmente fornecem resultados menos precisos - podem ser encontrados em Saastamoinen (1973) e Goad e Goodman (1974). Adicionalmente, a obra recente de Gouveia (2019) apresenta o desenvolvimento de uma função de mapeamento para o Brasil e América do Sul, denominado *Brazilian Mapping Function* (BMF).

Na equação genérica 2.5, o atraso hidrostático ZHD pode ser obtido a priori por meio de dados atmosféricos de temperatura, pressão e umidade. Esses dados podem ser obtidos por meio da integração de estações meteorológicas aos receptores GNSS (caso ideal) ou podem ser estimados a partir de modelos atmosféricos pré-definidos, que estimam as variáveis atmosféricas em função da posição do usuário e época do ano de interesse. Estes modelos, por exemplo, podem ser a atmosfera padrão (Berg, 1948), GPT (*Global Pressure and Temperature* – Boehm *et. al.*, 2006), modelo de Hopfield (HOPFIELD, 1969), modelo de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973) ou Modelos Numéricos de Tempo, que fazem a previsão de variáveis atmosféricas para uma determinada região e época (NOAA, 2020).

Conhecendo-se as funções de mapeamento para ambas as componentes, assim como o ZHD modelado a partir de dados de temperatura, o ZWD pode ser estimado como variável dentro do processamento GNSS, fazendo com que a convergência do valor ZTD venha a ter o mesmo comportamento ilustrado na Figura 4, no caso dos processamentos PPP, devido a correlação temporal do atraso (uma estimativa depende fortemente da estimativa anterior). Dentre as técnicas existentes para tal, destaca-se o processo estocástico *Random Walk*, que consiste em adicionar ruído na matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados, presumindo que a incerteza do parâmetro seja proporcional à raiz quadrada do intervalo de tempo entre as observações. Na maioria dos casos, após 30 min de dados, os resultados já podem ser considerados confiáveis, apresentando como saída tanto o valor do atraso zenital total, como os valores de suas componentes a cada época de rastreo.

Um dos modelos troposféricos recomendados pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*) é o *Global and Pressure Temperature 2* (GPT2), uma segunda versão do GPT - modelo oficial até 2013 (LAGLER *et. al.*, 2013). Este modelo, detalhado por Kouba (2009) é uma série harmônica com coeficientes harmônicos esféricos de ordem e grau 9, com uma grade espacial de 5° x 5° e foi gerado a partir de uma série temporal de 3 anos de observações climáticas mensais. Este é o modelo atualmente empregado pelo NRCAN e PPP-IBGE, e usa como função de mapeamento o GMF (*Global Mapping Function*) ou NMF (*Niell Mapping Functions*), desenvolvido a partir de séries de dados ERA-40. As séries consideraram 36 valores mensais para 312 pontos distribuídos pelo globo terrestre. Mais informações podem ser obtidas em Bohm *et. al* (2006) e IERS (2013).

2.3 GNSS-MET

As aplicações não-convencionais do GNSS em aplicações meteorológicas passaram a ser notadas em 1990, com a divulgação dos trabalhos de KLOBUCHAR (1987). Nestes trabalhos foram apresentadas adaptações do rastreo dos sinais de satélites, cuja finalidade era focada em navegação, para estudos atmosféricos e meteorológicos. Os sinais enviados pelas constelações passaram então a serem utilizados para monitoramento de atividades ionosféricas e de dinâmicas de vapor d'água. Nestas metodologias aproveitam-se os efeitos de atraso dos sinais, que são diretamente proporcionais ao conteúdo de agentes influenciadores (elétrons na ionosfera e gases na troposfera). Exemplos de monitoramento de atividades ionosféricas e quantificação de conteúdo total de elétrons podem ser encontrados nos trabalhos de Newby e Langley (1992), Camargo (1999) e Matsuoka (2007). Nestas produções literárias também estão contidas as metodologias e modelagens usadas nestas aplicações, assim como apresentação da intensidade dos efeitos ionosféricos em diferentes circunstâncias.

O ramo da previsão numérica de tempo passou a contar com as técnicas de rastreios GNSS após as publicações de Bevis (1992) e Kursinki et. al. (1995), onde o índice de vapor d'água atmosférico passou a ser vinculado ao atraso zenital total, obtido pelos métodos de processamento existentes. A modelagem do atraso zenital total, realizada a partir de um determinado modelo troposférico, juntamente com funções de mapeamento específicas, passou a ser empregado em todas as técnicas computacionais de processamento de dados GNSS desde então, obtendo, além da posição da estação, a variável ZTD e sua respectiva precisão.

Dentre as duas componentes do ZTD, o ZHD possui maior intensidade, geralmente na ordem de 2,3 m (OLIVEIRA, 2013), e sua variação é previsível em função da latitude, altitude e pressão atmosférica. Este fato permite que a modelagem da componente hidrostática do atraso neutrosférico para um determinado local seja realizada com precisão, aplicando-se a equação 2.7, cujo desenvolvimento pode ser visto em SAPUCCI (2001).

$$ZHD = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0,00028 h_0)} , \quad (2.7)$$

onde:

P_0 é a pressão atmosférica (em hPa) na altitude h_0 (em metros), vinculada a posição da antena;

φ é a latitude do local de rastreio;

a constante $2,27683157 \times 10^{-3}$ é dada em $m \cdot hPa^{-1}$, pois considera a constante específica dos gases hidrostáticos ($287,0538 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$) multiplicado pela constante de refratividade do ar $77,600 ^\circ K \cdot hPa^{-1}$ e dividido pela aceleração da gravidade ($9,784 m \cdot s^{-2}$); e

o divisor $(1 - 0,0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0,00028 h_0)$ é o termo que resta da constante gravitacional efetiva ($gm = 9,784 * [1 - 0,0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0,00028 h_0]$), dada como adimensional.

Sapucci (2001) realizou estudos de propagação de erros nas modelagens GNSS-MET e concluiu que, para determinação da componente ZHD com precisão ideal, o receptor e o sensor de pressão devem ser posicionados preferencialmente na mesma altitude, ou seu desnível deve ser muito bem conhecido. O autor menciona que diferenças de 0,3 mbar na medida de pressão alcançam 1 mm de diferença de água precipitável.

O ZWD é mais complexo de ser modelado, devido à alta variação espacial e temporal da pressão parcial do vapor d'água atmosférico associado. Possui variação média entre 10 a 25 cm e, quando se conhece a altura da coluna neutrosférica analisada, pode ser obtida aplicando-se a equação 2.8, que a quantifica em função das constantes de refratividade do ar, da temperatura, da compressibilidade do vapor d'água, da temperatura média da coluna troposférica e da pressão parcial do vapor d'água (de difícil determinação). Nessa equação torna-se necessário empregar a distância vertical a ser analisada, ou seja, a altura da camada úmida.

$$ZWD = 10^{-6} z_W^{-1} k'_3 \int \frac{e}{T^2} dh , \quad (2.8)$$

sendo:

z_W^{-1} como o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água (hPa^{-1});

k'_3 uma constante da refratividade do ar, em $^{\circ}K.hPa^{-1}$;

e a pressão parcial do vapor d'água, em hPa ;

T a temperatura superficial do local, em $^{\circ}K$; e

h a altitude do local analisado, em metros.

Ao empregar dados GNSS, a determinação do atraso úmido torna-se mais viável, devido a separação das duas componentes do atraso total. Assim, a equação 2.9 é o termo adotado para o atraso zenital, em função das duas componentes.

$$ZTD = ZHD + ZWD . \quad (2.9)$$

Como mostrado na seção 2.2.1, o ZTD pode ser obtido como variável no processamento GNSS. Ora, sendo o ZTD um valor já estimado, e o ZHD sendo determinado pela modelagem 2.6, tem-se então que a componente ZWD pode ser obtida através da equação 2.10. Desta maneira, tem-se o atraso da componente úmida determinado para aplicações meteorológicas.

$$ZWD = ZTD - ZHD . \quad (2.10)$$

A componente úmida possui uma forte correlação com a quantidade PWV na camada neutrosférica. O IWV (*Integrated Water Vapour*, acrônimo em inglês para Vapor D'água Integrado) é teoricamente definido como a integral da umidade absoluta ao longo da coluna vertical da atmosfera (conforme equação 2.11), cuja determinação numérica requer a utilização de radiômetros ou radiossondas, conforme Sapucci (2005). Como o mesmo autor relata, o emprego de tais equipamentos, por mais confiáveis que possam ser seus resultados, acabam sendo de difícil realização. Por este motivo, a correlação apresentada é muito explorada na atualidade para determinação do PWV a partir de observações GNSS.

$$IWV = \int_{h_0}^h \rho_w dh = ZWD * \Psi \quad (2.11)$$

Sendo:

ρ_w a umidade absoluta em por cento;

h a altura da camada troposférica da componente úmida, em metros; e

ψ a relação existente entre o atraso úmido e IWW, dado pela equação (2.12).

$$\psi = \frac{10^6}{R_W[k'_2 + \frac{k_3}{T_m}]} \quad (2.12)$$

Os termos na equação (2.12) são a constante específica do vapor d'água (R_W) em $J.kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$, duas constantes da refratividade do ar (k'_2 e k_3), em $^{\circ}K.hPa^{-1}$ e a temperatura média da coluna vertical troposférica (T_m) em $^{\circ}K$.

O PWV, dado em milímetros, é obtido dividindo-se o IWW, dado em kg/m^2 , pela densidade da água líquida ρ_a , em $kg.m^{-3}$, (equação 2.13), sendo esta variável utilizada para alimentar MPNTs. Na Tabela 03 são apresentadas as constantes utilizadas nesta seção, com seus respectivos valores e unidades.

$$PWV = \frac{IWW}{\rho_a} \quad (2.13)$$

Sapucci (2005) desenvolveu modelos de determinação da temperatura média (T_m) da coluna troposférica para o território brasileiro, usando dados de radiossondagens em todas as 5 regiões do país. Estes modelos são funções lineares da temperatura, pressão e umidade, atribuindo para cada uma dessas variáveis coeficientes determinados empiricamente. A equação para a região sul, por exemplo, é apresentada na sequência (equação 2.14), dada em função da temperatura superficial (T_s) em $^{\circ}K$, pressão superficial (P_s) em hPa e umidade relativa (UR) em por cento. Percebe-se que, nesse caso, a temperatura média da coluna troposférica não depende da pressão superficial.

$$T_m = 0,61390 * T_s + 0 * P_s + 0,020243 * UR + 102,815 \quad (2.14)$$

Os resultados de PWV obtidos pelas técnicas de radiossondagem e radiometria, possuem entre si, valores de raiz do erro médio quadrático das

discrepâncias iguais a 1,7 mm. Desta forma, sendo estas técnicas as duas melhores atualmente para se obter o vapor d'água, o valor geralmente admitido para as estimativas PWV-GNSS são de 2 mm, conforme o próprio Sapucci (2005) apresenta. Liang *et. al.* (2015) também cita essa tolerância, adotando-a em seus estudos.

Podem ser encontrados na bibliografia trabalhos onde a acurácia das estimativas PWV-GNSS foi avaliada. Alguns exemplos internacionais são Qimin *et. al.* (2019), Namaoui (2017) e Liang *et. al.* (2015); e nacionais são Sapucci (2001), Sapucci *et. al.*, (2007) e Carvalho Filho (2016).

TABELA 03 – CONSTANTES EMPREGADAS NAS MODELAGENS PWV

Constantes Utilizadas	Valor	Incerteza	Unidade de medida	Fonte
k_1	77,600	$\pm 0,05$	K/hPa	Bevis <i>et al.</i> , 1994
k_2	70,400	$\pm 2,2$	K/hPa	Bevis <i>et al.</i> , 1994
k_3	373900	± 1200	K^2/hPa	Bevis <i>et al.</i> , 1994
k'_2	22,1	$\pm 2,2$	K/hPa	Bevis <i>et al.</i> , 1994
Densidade da água líquida (ρ_a)	1.000	...	kg/m^3	Resnick & Halliday, 1984
Velocidade da luz no vácuo (c)	299.792.458	0,004 ppm	m/s	Resnick & Halliday, 1984
Massa molar dos gases hidrostáticos (M_k)	28,9644	$\pm 0,0014$	$kg/kmol$	Davis <i>et al.</i> , 1985
Massa molar da água (M_w)	18,0152	...	$kg/kmol$	Spilker, 1994
Constante universal dos gases (R)	8.314,34	$\pm 0,35$	$J/kmolK$	Davis <i>et al.</i> , 1985
Constante específica do vapor d'água (R_w)	461,5181	...	$J/kg K$	Davis <i>et al.</i> , 1985
Constante específica dos gases hidrostáticos (R_k)	287,0538	$\pm 0,0184$	$J/kg K$	Davis <i>et al.</i> , 1985

FONTE: Sapucci (2001)

2.4 INTERPOLAÇÃO ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA

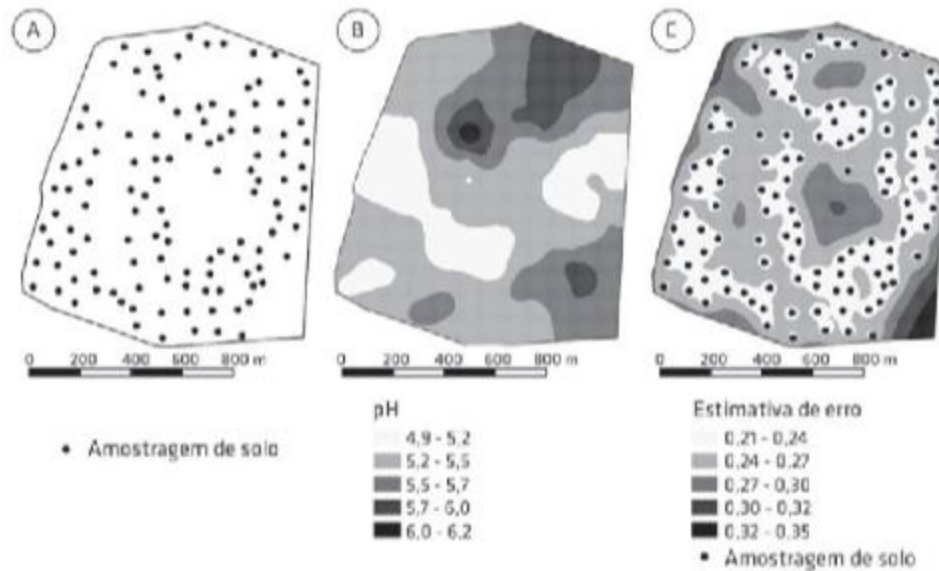
A interpolação espacial é uma técnica que faz uso de pontos onde a variável de estudo foi medida e, a partir destes, estima os valores nas regiões vizinhas, baseando-se na premissa de que amostras mais próximas tendem a ter valores mais semelhantes do que amostras mais afastadas (MIRANDA, 2005). Emprega-se ainda

determinado modelo matemático que expressa a relação entre as amostras do ambiente, e pelo qual serão estimados os valores nos locais desejados. Esta técnica é aproveitada para vários fins em diversas áreas do conhecimento, como geração de bases geológicas, modelagem das características topográficas de um terreno, estimativas de parâmetros físicos da atmosfera, obtenção de volume de produção em talhões de florestas plantadas, entre outros.

Conforme detalham Molin *et. al.* (2015), quatro principais regras devem ser consideradas a fim de se obter uma interpolação com qualidade, à saber: densidade de amostras coletadas, distribuição espacial das amostras, qualidade das medidas realizadas e fidedignidade do modelo matemático empregado. Quanto a densidade, justifica-se que fenômenos com maior variabilidade espacial exigem maior quantidade de amostras. Como exemplo, tem-se um modelo digital de terreno, onde amostras de altitudes devem ser coletadas em maior número em regiões com relevo mais acidentado do que em regiões planas, fator que impactará diretamente na acurácia do modelo; outro exemplo vem a ser a interpolação de dados de temperatura, que exigem maior quantidade de amostras em ambientes com gradiente de temperatura mais elevado (regiões frontogenéticas, por exemplo). Tão importante como a quantidade, a distribuição espacial dos pontos de coleta também pode afetar significativamente os resultados (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Áreas da região de estudo podem não conter amostras, enquanto outras áreas possuem quantidade exagerada, o que torna o modelo tendencioso. Isso fica mais claro ao verificar o exemplo da Figura 06, onde evidencia-se que locais com menor quantidade de pontos possuem um erro de estimativa maior. Isto é comum de ocorrer em casos em que as amostras foram distribuídas aleatoriamente. A definição da quantidade e distribuição dos locais mensurados é a etapa de maior atenção para o planejamento de coleta de campo, pois geralmente leva em consideração não apenas a qualidade do produto final, mas também o custo orçado para a operação (maior quantidade de amostras eleva o custo de campo), exigindo do especialista que encontre um equilíbrio entre ambos.

FIGURA 06 – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO DE KRIGAGEM

A) AMOSTRAS COLETADAS; B) RESULTADO PARA ESTIMATIVA DE pH DO SOLO; C) ESTIMATIVA DO ERRO DE PREDIÇÃO



FONTE: Molin *et. al.* (2015)

A qualidade das medidas efetuadas em campo impacta diretamente na acurácia da interpolação, uma vez que as amostras serão os pontos de apoio para todo o processo. Logicamente, amostras com pior qualidade fornecerão resultados piores. Por este motivo, as técnicas de coleta devem ser bem definidas, considerando a precisão dos equipamentos utilizados e opiniões técnicas de especialistas no uso de tais equipamentos, que varia conforme a variável que se quer analisar. O modelo matemático, entretanto, vem a ser uma decisão comum entre todas as áreas que fazem uso da interpolação espacial, pois as mesmas técnicas de processamento estão disponíveis para aplicação. As diferenças entre eles encontram-se na maneira como tratam os dados, atribuindo pesos diferentes as medidas amostradas, o que leva o mesmo conjunto de dados a proporcionar resultados distintos quando aplicados diferentes modelos, conforme esclarecem Yamamoto e Landim (2013).

Os interpoladores podem ser classificados em três classes principais (DRUCK *et. al.*, 2004):

- Modelos determinísticos de efeitos locais: Sem hipóteses estatísticas, cada ponto é estimado considerando apenas as amostras mais próximas e predominando efeitos locais;

- Modelos determinísticos de efeitos globais: Sem hipóteses estatísticas, cada ponto é estimado considerando apenas as amostras mais próximas e predominando efeitos em larga escala, sendo os efeitos locais não relevantes;
- Modelos estatísticos de efeitos globais e locais: Estimativa baseada nas amostras mais próximas considerando estimadores estatísticos, obtidos a partir da modelagem da variabilidade local e global do fenômeno.

Os interpoladores mais comuns vêm a ser a triangulação, inverso da distância, vizinho mais próximo, mínima curvatura e krigagem. Caso o leitor se interesse mais pelo conteúdo e exemplos de aplicações pode consultar, além dos autores já citados, também Carvalho e Queiroz (2002) e Fonseca (2009). Para fins práticos, este capítulo tratará apenas das técnicas de Inverso da Distância e Krigagem.

2.4.1 Método do Inverso das Distâncias

Conhecida pelo acrônimo em inglês IDW (*Inverse Distance Weighting*), a técnica do inverso da distância é um modelo determinístico local, considerado uma alternativa simples pois supõe que o fenômeno varia suavemente na superfície, sem picos ou descontinuidades. É tido como um estimador de densidade não-paramétrico, ou estimador *kernel*, que faz uso de um raio de busca pré-definido e um modelo que expresse a suavização do fenômeno espacial (DRUCK *et. al.*, 2004). Objetivamente, o valor em um determinado ponto será estimado a partir dos n pontos amostrais dentro de um determinado raio R , ponderando-se a partir da distância euclidiana entre a n -ésima amostra e o local a ser estimado. Este modelo é elevado a uma determinada potência, denominado ponderador, que quanto maior seu valor, maior o peso nos vizinhos mais próximos, o que, dependendo do valor, pode acarretar degradação proporcional da suavidade da superfície. Molin *et. al.* (2015) informa que o valor usual de ponderação é igual a 2, mas não é regra, ficando a cargo do especialista tal decisão. A equação genérica desta técnica é dada pela equação 2.15:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}, \quad (2.15)$$

sendo:

Z o valor estimado para o respectivo ponto;

n o número de pontos amostrais na vizinhança;

Z_i o valor no ponto amostral i ;

d_i a distância entre os pontos amostral e estimado;

p é o ponderador.

2.4.2 Krigagem

A geoestatística considera dois efeitos nas medidas de uma variável: o efeito regional, que depende de fato da localização da amostra, cujo valor varia no espaço, e efeito aleatório, que considera a flutuabilidade estocástica das mensurações. A krigagem permite fornecer, além da estimativa dos valores em locais não mensurados, o erro de estimativa do processo, a descrição de padrões espaciais por meio de semivariogramas e a otimização de grades amostrais, conforme explica Molin *et. al.* (2015). Oliver (2010) comenta ainda que a ferramenta principal para as análises em geoestatística é o semivariograma, pois este permite visualizar a relação espacial dos valores das amostras, expressando suas variações conforme aumenta-se a distância entre elas. Em outras palavras, a estrutura do fenômeno fica evidenciada a partir de uma análise relativa dos dados. Os valores do semivariograma são determinados pela equação 2.16, apresentada por Bernardi *et. al.* (2014), para uma respectiva distância h .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (2.16)$$

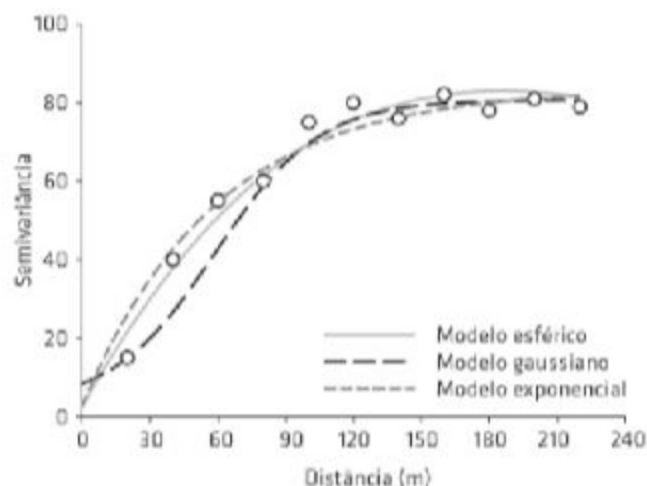
onde:

$N(h)$ é o número de pares de valores analisados; e

$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os valores em dois pontos, distintos e separados pelo vetor h .

A aplicação da equação 2.15 fornece valores que, quando plotados (abscissa como vetores de distâncias e ordenada como valores de semivariância), geram o que se denomina semivariograma experimental. Ajusta-se a estes dados uma função ou modelo matemático que se adeque ao conjunto o mais fielmente possível, denominado de semivariograma teórico, em cima do qual as estimativas serão realizadas. Os modelos mais usuais são o exponencial, o de potência, o esférico e o gaussiano. Outros modelos existentes, bem como, as formulações matemáticas podem ser visualizadas nos autores já mencionados. Na Figura 07 é apresentado um exemplo de semivariograma experimental, com exemplos de funções teóricas ajustadas aos dados.

FIGURA 07 – EXEMPLO DE SEMIVARIOGRAMAS EXPERIMENTAL E TEÓRICOS



FONTE: Molin *et. al.* (2015)

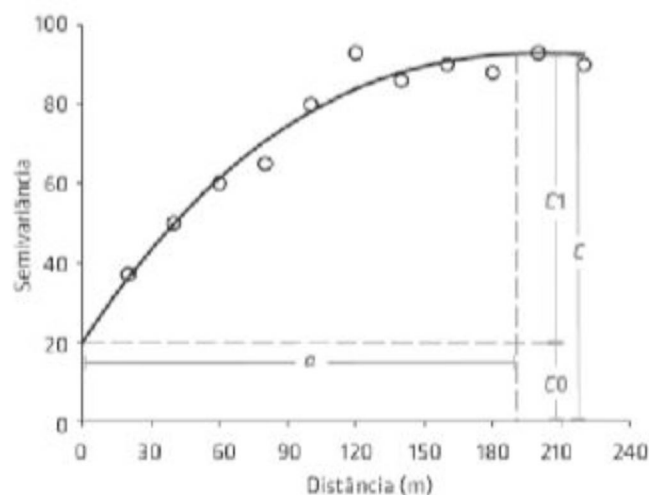
O semivariograma teórico ajustado possui três componentes importantes para as análises a serem realizadas, denominados de coeficientes de correlação espacial. Estes coeficientes serão os determinantes dos modelos, e são essenciais para as estimativas dos valores desejados. Os três coeficientes serão apresentados na sequência (DRUCK *et. al.*, 2004) e são ilustrados na Figura 08.

- Pepita (*nugget* - C_0): porção da variância não explicada pela distância, resultado da flutuabilidade estatística dos dados. Em outras palavras é o valor de semivariância obtido quando a distância é igual a zero. Quando os dados do semivariograma não apresentam nenhuma relação espacial, chama-se esta

condição de “efeito pepita puro”, o que indica que seus valores não são razão da distância entre os pontos e, portanto, são independentes.

- Alcance (*range* - a): distância a partir da qual os valores deixam de ser dependentes, e a variação entre eles já não é mais função da distância. Ou seja, a semivariância se estabiliza e os valores passam a não aumentar mais proporcionalmente à distância. Quanto menor este valor, maior a variabilidade do fenômeno, exigindo maior quantidade e proximidade de amostras. Aponta ainda até qual distância o estimador deverá levar em consideração visando obter a predição para um determinado ponto.
- Patamar (*sill* - C): valor de semivariância que marca a estabilidade originada pelo alcance, composta pelo efeito pepita acrescido da variância estrutural (C_1). A razão entre o efeito pepita e este coeficiente fornece o grau de dependência espacial, que indica o quão agrupado é a distribuição espacial do fenômeno.

FIGURA 08 – PARÂMETROS DE CORRELAÇÃO ESPACIAL



FONTE: Molin *et. al.* (2015)

A análise do semivariograma e de seus respectivos coeficientes é essencial para a compreensão do comportamento do fenômeno na região de estudo. Valores anômalos, provenientes de erros grosseiros de medidas ou outra fonte qualquer, devem ser eliminados, de modo a não influenciar a modelagem da dependência espacial, explicado por Yamamoto e Landim (2013). Deste modo, deve-se empregar as técnicas de análise exploratória e estatística descritiva, por exemplo, para analisar o conjunto de dados. Quando o semivariograma não atinge um patamar, diz-se que o

conjunto apresenta tendência, exigindo tratamento preliminar dos dados ou aplicação de técnica que leve isto em consideração.

2.4.3 Técnicas de Krigagem

Druck *et. al.* (2004) informa que o método da krigagem engloba um conjunto de técnicas predição de superfícies, baseada na correlação espacial modelada para o conjunto de dados por meio do semivariograma. É tido como o melhor interpolador linear não enviesado com menor variância nas estimativas, e possui várias segmentações de acordo com a técnica utilizada. É um método amplamente utilizado principalmente em estudos geológicos, geofísicos e agrícolas, pois permite uma representação de dados ideal para estas aplicações. Uma estimativa por krigagem é realizada em três passos já discutidos: a análise exploratória dos dados, a análise estrutural pelo semivariograma e a interpolação geoestatística. Neste item serão discutidos alguns métodos de krigagem mais úteis para procedimentos de geoestatística.

A técnica mais usual é tida como a krigagem ordinária, que prioriza a dependência espacial e exige estacionariedade dos dados, pois considera conjunto sem tendências (OLIVER, 2010). Nesta técnica, as amostras devem apresentar clara dependência espacial, sem fatores que venham a influenciar esta condição, caso contrário as estimativas serão tendenciosas e não acuradas. Em casos, por exemplo, onde o semivariograma não atinge um patamar, recorre-se a técnica da krigagem universal, que permite uma estimativa mais fiel, sem necessidade de estacionariedade das semivariâncias. Ou seja, esta segunda técnica é mais tolerante a um conjunto de dados com tendências.

Quando o especialista dispõe de um conjunto de dados secundário (co-variáveis), que possui correlação com o primeiro, tem-se alternativas que viabilizam a integração destas variáveis auxiliares de modo a tornar a estimativa mais fidedigna. Por exemplo, a co-krigagem fornece resultados a partir de um semivariograma cruzado, uma vez que esteja disponível, para as mesmas amostras, uma ou mais variáveis extras de apoio (BERNARDI *et. al.*, 2014). Esta técnica é bastante explorada quando se deseja estudar um fenômeno com pouca correlação espacial, mas é

possível mensurar outro parâmetro com maior dependência espacial e fortemente proporcional ao primeiro. Ao fim, resumidamente, são realizadas duas interpolações geoestatísticas com cada variável, fazendo a primeira dependente da segunda, por exemplo, e atribuindo pesos para cada uma destas. Em casos em que a segunda variável é conhecida já em toda a região de estudo (como um grid ou um arquivo *raster*) pode-se fazer uso da co-krigagem colocizada, onde os valores desta variável na vizinhança do ponto a ser estimado são reduzidas a um único valor vinculado a este ponto, reduzindo assim problemas oriundos de dados secundários mal modelados. Conforme explicam Carvalho e Queiroz (2002), a técnica de semivariograma cruzado é realizada então a partir dessa base de dados.

2.5 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

Durante atividades de análise de dados ou de controle e monitoramento de processos, a estatística possui grande importância por ser uma linguagem que gera informações acerca da qualidade dos procedimentos (MONTGOMERY, 2016). Isso porque os métodos estatísticos fornecem ao analista meios para amostragem, testes e validações de um conjunto de dados que, quando adequadamente interpretados, levam a conclusões mais consistentes sobre o evento estudado, permitindo ainda avaliar se a metodologia corresponde as expectativas ou deve ser alterada. Nesse leque, muitas técnicas existem tanto para tratamento quanto para visualização dos dados, meios que expressam as características da variável e também indicam se as determinadas hipóteses são aceitáveis em termos do fenômeno estudado.

Uma das ferramentas mais tradicionais para análise de qualidade e metodologias científicas é a inferência estatística, útil para avaliar a amostra de dados e tirar conclusões sobre a população estudada. Esta atividade faz uso de estimativas de parâmetros (tais como média, variância e desvios padrão) e testes de hipótese, considerando uma distribuição estatística específica. Uma hipótese, conforme explica Bussab e Morettin (2017), é uma afirmativa sobre os parâmetros de uma distribuição de probabilidade, podendo ser classificada em “Hipótese Nula” (H_0), em que a hipótese afirma que determinado parâmetro é igual a um valor hipotético, ou “Hipótese

Alternativa” (H_1), em que a hipótese afirma que o referido parâmetro é maior, menor ou diferente do valor hipotético da hipótese nula. Ambas as hipóteses são formuladas simultaneamente, e suas definições são essenciais para condução do experimento. A definição do valor do parâmetro analisado na hipótese nula é realizada por meio do conhecimento prévio de um valor de referência; por meio de especificações contratuais ou definições de projeto; ou ainda por alguma teoria ou modelo do processo (MONTGOMERY, 2016). Em todos os casos, essa análise é conduzida a partir de um nível de confiança pré-estabelecido (α) e da adoção de um modelo de distribuição adequado. A decisão de qual distribuição adotar deve considerar vários fatores, dependendo da técnica de coleta de dados, da característica do conjunto de amostras, da existência ou não de tendência ou do valor de referência escolhido. O nível de confiança α padrão geralmente é adotado como 95% (o que não é regra), e seu complementar $1 - \alpha$ é denominado de nível de significância.

Tem-se ainda que a hipótese alternativa testada pode ser conduzida de forma bicaudal (bilateral) ou unicaudal (unilateral). Com a primeira limita-se a analisar se o parâmetro testado é diferente do valor hipotético da hipótese nula, sem definição de qual a direção de divergência (maior ou menor). Com a segunda é possível especificar a direção, ou seja, atestar se o parâmetro é maior ou se é menor que o valor hipotético, porém é possível apenas analisar uma das direções por vez, e não simultaneamente (BUSSAB e MORETTIN, 2017).

2.5.1 Teste Mann-Whitney (U)

O Teste U de Mann-Whitney é um dos métodos de inferência estatística não-paramétricos mais usuais, utilizados para comparar duas amostras independentes (BUSSAB e MORETTIN, 2017). Por ser não-paramétrico, este teste é aplicado para qualquer distribuição, sem a necessidade de que os conjuntos de dados sigam distribuições normais. É indicado em casos de comparação de dois grupos não pareados, de modo a verificar se ambos provêm da mesma população, sendo sua hipótese nula a igualdade das medianas. A sequência de fórmulas para o cálculo da estatística U é dada pelas equações 2.17 a 2.19.

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - \sum_{i=1}^n x_{i_1} \quad , \quad (2.17)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - \sum_{i=1}^n x_{i_2} \quad , \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} U = U_1, & \text{se } U_1 < U_2 \\ U = U_2, & \text{se } U_2 < U_1 \end{cases} \quad , \quad (2.19)$$

sendo:

U_1 e U_2 os valores do teste Mann-Whitney para os conjuntos de amostras 1 e 2, respectivamente;

n_1 e n_2 os tamanhos dos conjuntos de amostras 1 e 2, respectivamente; e

x_{i_1} e x_{i_2} o i -ésimo valor do conjunto 1 e 2, respectivamente.

Nos casos em que o tamanho do conjunto amostral é menor que 20, U é utilizado para obtenção do valor crítico a partir da tabela de valores críticos de Mann-Whitney. Caso contrário ele é usado para obter o valor z , que será o valor de consulta para a tabela de pontuação Z da distribuição normal (equações 2.20 a 2.22). Ou seja, um conjunto com mais de 20 amostras possui distribuição próxima a uma distribuição normal (LEHMANN e D'ABRERA, 1975).

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad , \quad (2.20)$$

$$\mu = \frac{n_1 n_2}{2} \quad , \quad (2.21)$$

$$z = \frac{U - \mu}{\sigma} \quad , \quad (2.22)$$

sendo:

σ e μ , respectivamente, o desvio padrão e a média de U .

Assim como outros testes de inferência, Mann-Whitney também provê o parâmetro p-valor, que é uma probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula, conforme explicam Lehmann e D'abrera (1975). Quanto menor o p-valor, mais forte a evidência contra a hipótese, podendo ainda, quando comparado a determinado nível de significância, inferir a aprovação ou rejeição desta. A regra geral é que o p-valor seja maior que o nível de significância estabelecido.

Não sendo o intuito do presente trabalho explicar detalhadamente a distribuição U , mas apenas o suficiente para que o leitor compreenda os métodos de avaliação, um aprofundamento sobre as análises estatísticas e de controle de qualidade poderão ser encontrados em Gibbons e Chakraborti (2003) e Sprent (1989), além daqueles citados ao longo da seção. Nestas bibliografias serão encontrados detalhes, formulações, exemplos, gráficos e outras informações sobre as distribuições e testes aqui brevemente discutidos.

2.6 ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

A Análise das Componentes Principais, ou ACP, conduz à identificação de padrões entre diferentes variáveis supostamente correlacionadas, a partir de transformações matemáticas ortogonais (ANDERSON, 2003). Este procedimento converte os valores das variáveis correlacionadas para conjuntos de valores linearmente não-correlacionados, outrora denominados de Componentes Principais (CP). Em outras palavras, a ACP é realizada usando-se n conjuntos de dados, explorando suas variâncias e estruturas, e tem como saída outros n conjuntos. O primeiro conjunto de saída refletirá valores que expressam a maior similaridade entre os conjuntos originais. O segundo refletirá valores que expressam similaridade em menor grau, e consecutivamente, até que o último conjunto restará apenas os resíduos com menor similaridade. Conforme explica Rencher (2002), a aplicação da ACPs é realizada em diversos estudos interdisciplinares e não possui limite de número de conjuntos a serem analisados, contudo exige atenção quanto a sua aplicação, por ser uma metodologia sensível a alterações ou influências nos conjuntos analisados. Dentro das ciências geodésicas suas aplicações são bastante comuns em estudos de sensoriamento remoto, tais como Munyati (2004) e Gomes e Maldonado (1998). No ramo da meteorologia a ACP também tem sua importância, evidenciada, conforme toda a obra de Preisendorfer e Mobley (1988) detalha. Um exemplo de aplicação ACP em dados GNSS é Xavier (2000), que utilizou esta análise para estudar uma rede geodésica local no litoral paranaense.

A utilidade da ACP em trabalhos de estudo de homogeneidade de estações se dá devido a variância do conjunto de dados explicada por cada CP, os carregamentos produzidos para cada estação e os scores resultantes das séries temporais (FERREIRA, 2011). Os carregamentos (ou *loadings*) indicam se as séries de um determinado grupo de estações possuem a mesma característica em termos de variâncias, ou seja, se a variabilidade espacial é similar. Por outro lado, a análise dos scores demonstra o padrão dos dados na variabilidade temporal.

2.7 TESTE DE HOMOGENEIDADE REGIONAL

Cada distribuição de probabilidade possui características que refletem sua estrutura e comportamento, a partir das quais são realizadas análises estatísticas descritivas sobre um determinado conjunto de dados. A escala e forma de uma distribuição de probabilidade, segundo Hoskings (1990), pode ser interpretada a partir de grandezas específicas, denominadas “Momentos-L”. Tais momentos são úteis para descrição do comportamento da distribuição de uma amostra, e são classificados segundo seus centros de distribuição, existindo, conforme apresentam Snedecor e Cochran (1989), os momentos centrados na origem e os momentos centrados na média. Por exemplo, o momento centrado na origem (ou apenas momento) de ordem 1 representa a média de uma amostra, enquanto o momento centrado na média de ordem 2 representa a variância. Em uma análise preliminar, este conceito parece ser demasiado complexo para expressar descritores simples, como os dois casos citados, entretanto, sua viabilidade é mais bem observada quando se aprofunda nos conceitos de tendência, assimetria, curtose e dispersão, isso porque a obtenção destes valores é função de momentos estatísticos. Hoskings (1990), Hosking e Wallis (1997) e Naghettini e Pinto (2007) apresentam a formulação para cálculo dos momentos e seus derivados (estes denominados de momentos abstratos). Os momentos descritivos possuem muita utilidade na análise multivariada, pois fornecem informações profundas dos dados de um conjunto de estações e séries temporais. Naghettini e Pinto (2007) é uma obra que demonstra a potencialidade desta análise estatística no ramo da hidrologia e estudos meteorológicos. O teste de homogeneidade regional de

Hosking, por exemplo, emprega coeficientes de dispersão (t), assimetria (t_3) e curtose (t_4) para avaliar se um número i de estações está contido em uma região homogênea, baseado nos dados da variável estudada. A relação entre estes coeficientes e os momentos é apresentada nas equações 2.23, 2.24 e 2.25.

$$t = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (2.23)$$

$$t_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (2.24)$$

$$t_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (2.25)$$

Onde:

λ_1 , λ_2 e λ_3 são, respectivamente, os momentos de ordem 1, 2 e 3 da amostra.

Segundo Hosking e Wallis (1997, *apud* GONÇALVES, 2013) o teste de homogeneidade regional pode ser realizado a partir da análise da medida de heterogeneidade calculada para um conjunto de dados de uma determinada região. Seja i estações, com um conjunto simultâneo de n observações, a medida de heterogeneidade indicará se a região pode ser adotada como homogênea ou heterogênea, em termos da variável estudada. Esta metodologia é bastante empregada em análises hidrológicas, pois é útil na delimitação de áreas igualitárias e no estudo de padrões de dados atmosféricos.

Sendo os três principais momentos abstratos do conjunto de n dados da estação i : t , t_3 e t_4 , ajusta-se uma distribuição kappa a região de análise. Para isto simula-se um grande número N de realizações de uma região com i estações, cujos momentos respeitam a distribuição kappa. O desvio-padrão dos momentos t das estações é calculado em cada simulação. Após o fim das simulações, a média deste conjunto de desvios padrão é calculada (μ_V), assim como o seu desvio padrão (σ_V). O conjunto original de momentos t das estações de estudo, também tem seu desvio padrão calculado (V). De posse destes valores, a medida de heterogeneidade (H) é dada pela equação 2.26.

$$H = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V} \quad (2.26)$$

Considera-se a classificação da região da seguinte maneira (HOSKING e WALLIS, 1997):

- Aceitavelmente homogênea, caso $H < 1$;
- Possivelmente heterogênea, caso $1 \leq H \leq 2$; e
- Definitivamente heterogênea, caso $H > 2$.

3. METODOLOGIA

Este capítulo abordará a metodologia empregada para aquisição dos dados em campo e execução das atividades de análise, de modo a atingir os objetivos expostos na seção 1.3.

Para o estudo foram utilizados arquivos *RINEX* de três estações (Curitiba - UFPR, Araquari - SCAQ, e Cananeia - NEIA) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), disponibilizados pelo FTP do IBGE no seguinte endereço eletrônico <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=downloads>. Também foram realizadas campanhas de campo para aquisição de dados em outros três pontos estratégicos não englobados pela RBMC (Piraquara – PIR -, Antonina – ANT – e Pontal do Paraná – CEM) totalizando seis estações, com arquivos *RINEX* diários.

A aplicação PPP-IBGE foi utilizada para processamentos, resultando, para cada *RINEX* processado, um arquivo *.pos* contendo os valores ZTD (Figura 09), entre diversas outras informações como horário, posição, precisões, conteúdo de elétrons na atmosfera e gradientes troposféricos. Os valores ZTD foram organizados em séries temporais.

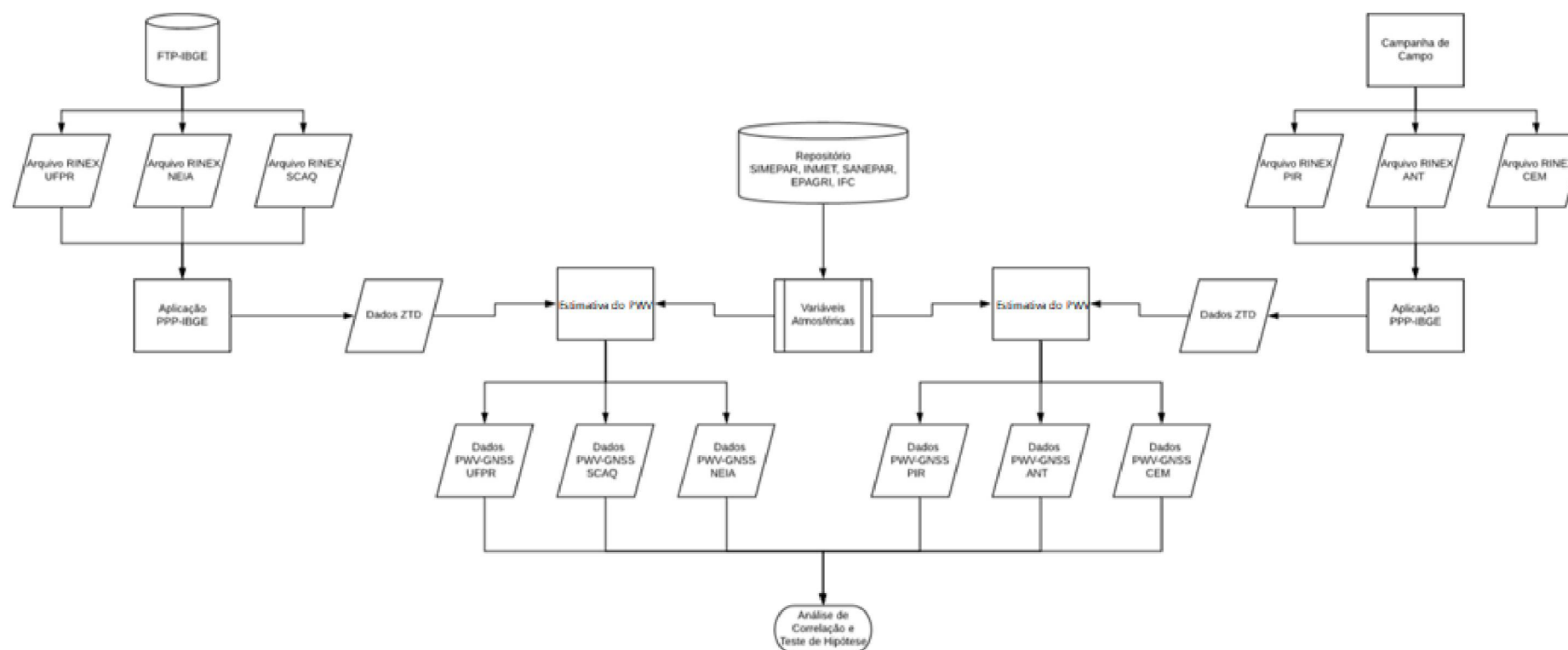
A conversão dos valores ZTD para PWV foram realizadas usando-se a metodologia apresentada por Sapucci (2005), e descrita na seção 2.3. Como a maioria das estações utilizadas no atual estudo estão localizadas na região sul do Brasil (com exceção da estação NEIA), foram empregados os coeficientes indicados para esta região possibilitando estimar o valor da temperatura média da coluna troposférica. Mesmo a estação NEIA se localizando na região sudeste, pela curta distância à região de estudo, considerou-se os mesmos coeficientes. Os dados de temperatura, pressão e umidade foram obtidos por meio de estações meteorológicas próximas a cada local de instalação das antenas GNSS, de modo a realizar a modelagem PWV da maneira mais fidedigna possível. As instituições responsáveis pelas estações e dados meteorológicos empregados nesse trabalho foram o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) e Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). Os parâmetros

atmosféricos, além de serem utilizados para cálculo do valor de T_m , foram também empregados para estimar o ZHD, por meio da equação 2.7.

A aplicação PPP-IBGE fornece em seus arquivos .pos, valores de ZWD calculados a partir de valores atmosféricos obtidos pelo modelo GPT2. Contudo neste estudo não foram empregados estes valores para estimar o PWV, visto que aqui nesta pesquisa se fazem necessários valores o mais acurado possível do vapor úmido, visando investigar a eficácia da metodologia.

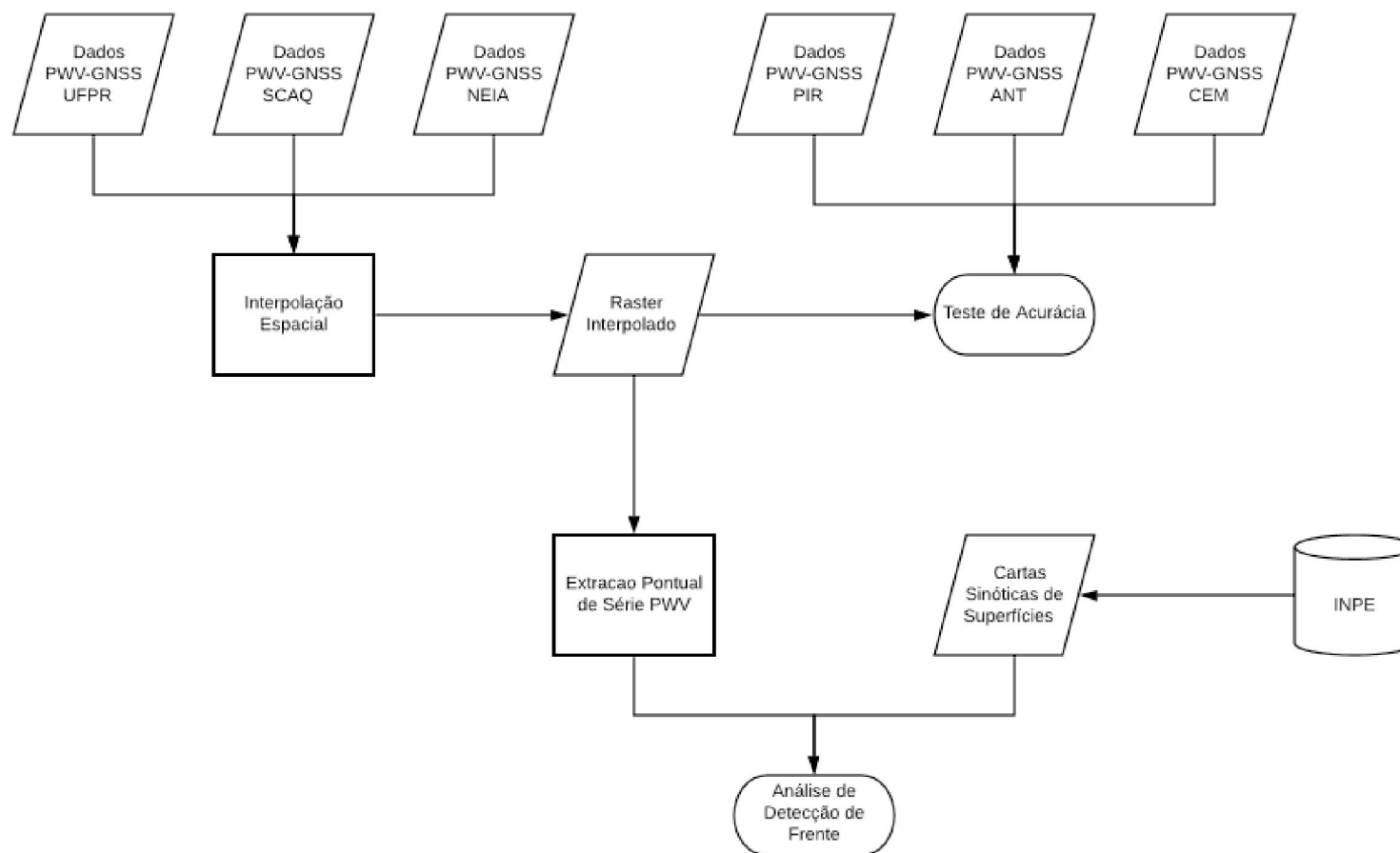
Finalmente, os valores PWV foram obtidos através das equações 2.11, 2.12 e 2.13. Esses valores foram os dados investigados ao longo desta pesquisa, que contaram com estudos de correlação e homogeneidade das estações GNSS empregadas, assim como interpolações espaciais, análise de acurácia e identificação de padrões de comportamento em eventos de passagem de frentes. Na Figuras 09 é apresentado o esquema de etapas para a análise de correlação entre as estações GNSS, e na Figura 10 o esquema de etapas para a interpolação e identificação de passagem de frentes. Cada uma das etapas será detalhada ao longo do capítulo.

FIGURA 09 – ESQUEMA DE ETAPA DE ANÁLISE DE CORRELAÇÃO



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 10 – ESQUEMA DE ETAPA DE INTERPOLAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE FRENTE

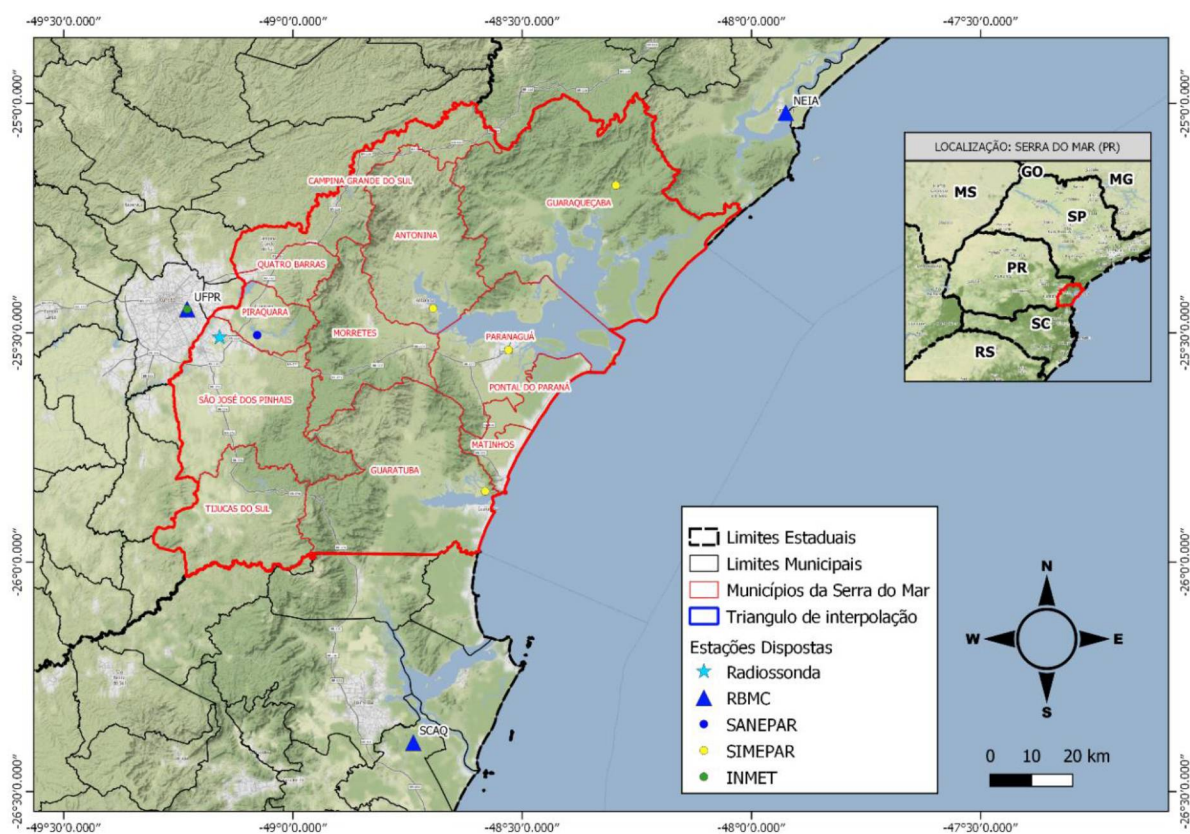


FONTE: O Autor (2020)

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

Segundo o Instituto de Terras, Cartografia e Geociências do Paraná (ITCG , 2019), a Serra do Mar paranaense possui uma área de 386 mil hectares, com extensão de aproximadamente 60 km x 120 km, e relevo bastante acidentado, apresentando variação de altitude de 0 m a 1.680 m. Se localiza ao leste do estado do Paraná, abrangendo os municípios de Antonina, Guaraqueçaba, Guaratuba, Matinhos, Morretes, Paranaguá, Piraquara, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, São José dos Pinhais e Tijucas do Sul. Atualmente a região possui 7 estações meteorológicas, automáticas e convencionais, sendo 5 pertencentes ao SIMEPAR, 1 pertencente ao INMET e 1 pertencente a SANEPAR. Também, a aproximadamente 20 km da região, se situa o Aeroporto Internacional Afonso Pena, em São José dos Pinhais, onde ocorre o lançamento de radiossondas duas vezes ao dia, coletando informações atmosféricas do local. O rastreamento contínuo de sensores GNSS da RBMC ocorre em três estações em torno da área: UFPR, localizada em Curitiba, e NEIA, em Cananéia, há aproximadamente 30 km da Serra Paranaense; e SCAQ, localizada em Araquari, há aproximadamente 50 km da Serra Paranaense. Na figura 11 é mostrada uma ilustração da localização da Serra do Mar paranaense e a disposição de estações meteorológicas no local.

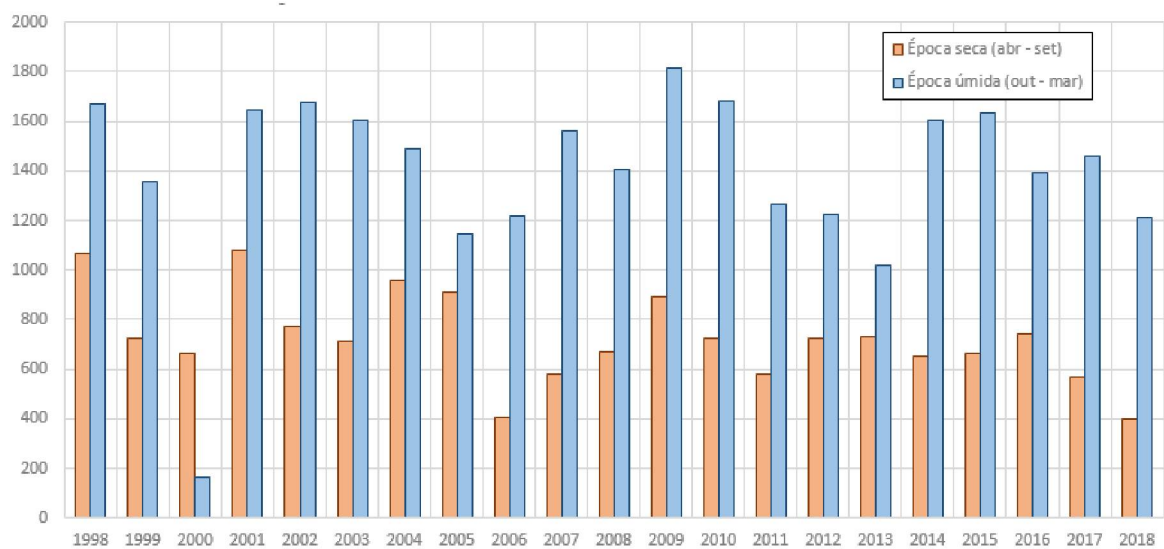
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS



FONTE: O Autor (2020)

A região possui alta pluviosidade, destacando-se do restante do estado (conforme observado na Figura 12), devido a dinâmica de massas de ar e os efeitos de ciclones atuantes sobre a região. Na Figura 13 é apresentado o gráfico de precipitação anual média para toda a região nos últimos 20 anos (1998 - 2018), segundo dados do sensor TRMM de precipitação. Além da ocorrência frequente de precipitação, a Serra do Mar também se destaca pela alta ocorrência de neblina e geadas (Figura 14).

FIGURA 13 – PRECIPITAÇÃO ANUAL SEGUNDO SATÉLITE TRMM



72

FIGURA 14 – EXEMPLOS DE a) RELEVO E b) CLIMA DO LOCAL DE ESTUDO



FONTE: BEMPARANÁ (2020)

3.2 COLETA E AQUISIÇÃO DE DADOS

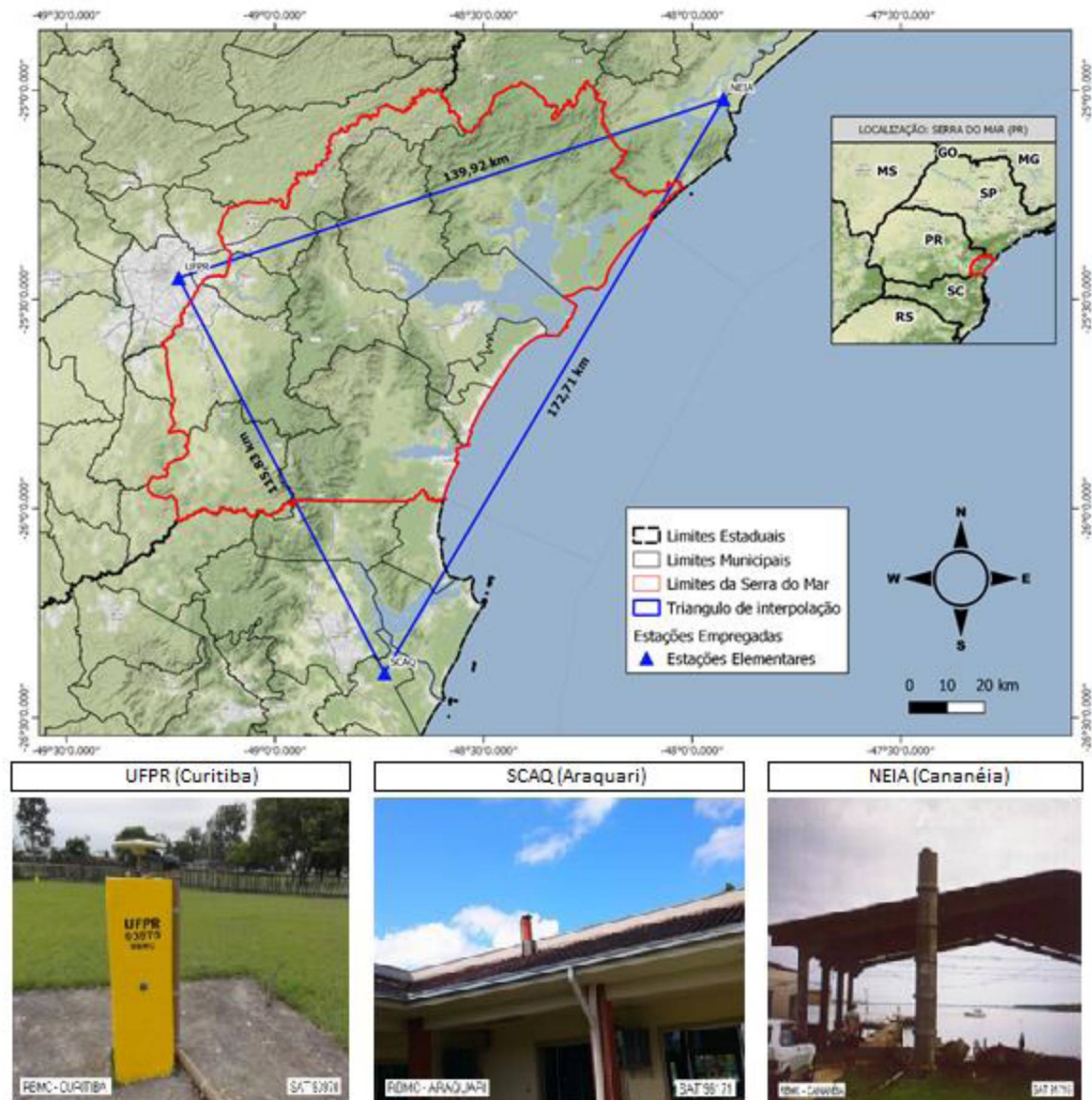
A aquisição dos dados foi planejada pensando na modelagem dos índices PWV para as estações GNSS. Os dados utilizados no estudo em questão foram obtidos a partir de estações RBMC contínuas mantidas pelo IBGE, e por campanhas de campo realizadas especificamente para este trabalho. Também foram empregados dados de temperatura e pressão de estações meteorológicas, de modo a obter os melhores resultados possíveis na modelagem, evitando injeção de incertezas oriundas de modelos atmosféricos. O presente capítulo descreve as etapas de coleta e aquisição de dados realizadas durante o trabalho.

3.2.1 Estações elementares

As técnicas de interpolação espacial exigem a mensuração da variável de interesse em pontos estratégicos, de onde o valor será interpolado para os demais locais onde a medida não foi realizada. Nesta pesquisa, sendo a variável o PWV, os referidos pontos serão as estações GNSS da RBMC situadas em torno da região de estudo (UFPR, NEIA e SCAQ), e são aqui denominadas por “estações elementares”. Sendo a RBMC uma rede de monitoramento com rastreios contínuos e ininterruptos, com coleta de dados a cada 15 s, não houve preocupação quanto a estas estações, no que se refere a logística para instalação das antenas ou cautela durante as

campanhas de campo. Na Figura 15 estão contidas as localizações e imagens destas estações.

FIGURA 15 – ESTAÇÕES ELEMENTARES E TRIÂNGULO DE INVESTIGAÇÃO



FONTE: O Autor (2020)

As coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude elipsoidal) das referidas estações (todas as coordenadas geodésicas neste trabalho estão referenciadas ao sistema SIRGAS2000, época 2000,4):

- UFPR: 25° 26' 54,12695" S, 49° 13' 51,43717" W e 925,807 m;
- SCAQ: 26° 23' 37,52429" S, 48° 44' 14,78677" W e 17,285 m;
- NEIA: 25° 01' 12,86150" S, 47° 55' 29,88667" W e 6,055 m.

3.2.2 Estações de Verificação

Com as estações elementares definidas, o foco principal passa a ser a acurácia dos resultados obtidos após a aplicação da interpolação. Esta validação foi realizada a partir de dados GNSS obtidos em campanha de campo na região de estudo, em pontos denominados “estações de verificação”, cujos resultados após a modelagem serviram para comparação dos valores interpolados.

Foram instaladas três antenas dentro do triângulo de estudo, com rastreo contínuo entre os dias 11 de novembro de 2019 e 02 de dezembro de 2019, com intervalo de gravação de 30 s. Os fatores levados em consideração na escolha do local destes rastreios foram:

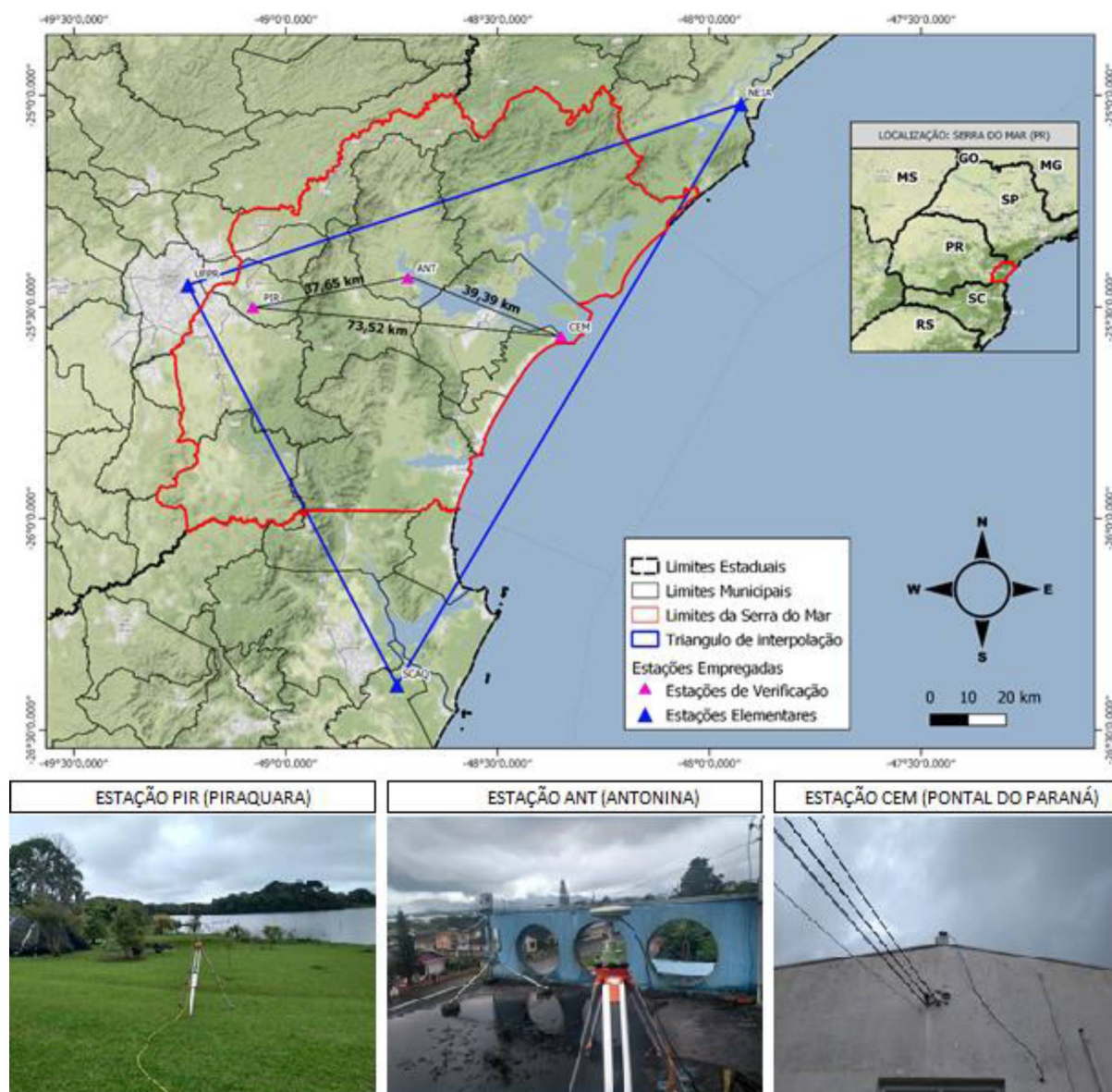
- Distância mínima entre os pontos de verificação: de modo a evitar pontos de verificação muito próximos, tendenciando os resultados, foi fixada uma distância mínima de 35 km entre os receptores;
- Segurança do receptor: As alternativas de locais para instalação dos receptores eram dependências de instituições com parceria com o LAGEH-UFPR, assegurando a cautela e observação contínua das antenas instaladas;
- Disposição de estações meteorológicas próximas: Priorizou locais onde haveria equipamentos meteorológicos operando continuamente para posterior aquisição de dados para a modelagem PWV; e
- Logística e planejamento: pensando-se em limites orçamentários, algumas alternativas foram descartadas para redução de custos com gasolina ou hospedagem, principalmente em casos de pane no receptor ou quaisquer outros eventos que exigissem deslocamento ao local.

Levando-se em conta os itens anteriormente expostos, os três locais escolhidos para instalação das estações de verificação foram (Figura 16):

- 1) Casa da Cultura da SANEPAR, ao lado do reservatório Piraquara II, no município de Piraquara, com coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude) 25° 30' 18" S, 49° 4' 40" O e 897,26 m;
- 2) Escola Municipal Professor Gil Feres, na laje do edifício, localizado no município de Antonina, com coordenadas geodésicas 25° 26' 9" S, 48° 42' 40" O e 14,32 m; e

- 3) Laboratório de Oceanografia Geológica, do Centro de Estudos do Mar da UFPR, localizado no município de Pontal do Paraná, com coordenadas geodésicas 25° 34' 26" S, 48° 21' 01" W e 7,52 m.

FIGURA 16 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor (2020)

Nos três pontos de verificação foram instalados receptores modelos Leica 1203+ GNSS, de dupla-frequência L1+L2, com observações GPS e GLONASS, e precisão nominal de 5 mm + 0,5 ppm em rastreios estáticos. A Tabela 04 traz as informações de horários de rastreamento em cada receptor.

TABELA 04 – HORÁRIOS DE RASTREIO

Estação	Início (UTC)	Fim (UTC)	Intervalo
PIR	11/11/2019 11 h 23 min	02/12/2019 11 h 24 min	1 min
ANT	11/11/2019 15 h 23 min	02/12/2019 16 h 56 min	1 min
CEM	11/11/2019 20 h 01 min	02/12/2019 13 h 44 min	1 min

FONTE: O Autor (2020)

3.2.3 Dados meteorológicos

Conforme mencionado na seção 2.3, a qualidade dos valores de temperatura e pressão impactam significativamente nos resultados PWV obtidos na modelagem GNSS-MET. Por este motivo foram utilizados dados de estações meteorológicas localizadas próximas aos receptores GNSS, possibilitando a vinculação de tais dados durante a etapa de conversão de valores de ZWD para PWV. Entretanto, sendo a variável pressão sensível a variações de altitude (seção 2.2), todo o cuidado foi tomado pensando-se em reduzir os valores de pressão do barômetro da estação meteorológica a altura da respectiva antena GNSS. Para tanto, foram realizados levantamentos geodésicos visando a determinação das coordenadas aproximadas (latitude, longitude e altitude elipsoidal) dos referidos barômetros, e posteriormente efetuar as correções dos valores de pressão da diferença de altura entre os equipamentos. Nesta etapa, foram efetuados os seguintes procedimentos:

- Materialização de vértice próximo à estação meteorológica por meio de piquete de madeira;
- Rastreio GNSS com duração de 1h sobre o ponto materializado, para posterior determinação de suas coordenadas geodésicas pelo método PPP (por exemplo, figura 17a);
- Transporte de altitude utilizando estação total Leica TCRA 1203+, por meio de seu medidor eletrônico de distância a laser (figura 17b), determinando assim os vetores de posição tridimensional entre o vértice materializado e o sensor de pressão (DX, DY, DZ);

- Processamento e obtenção das coordenadas do vértice rastreado e posterior cálculo da altitude do sensor de pressão. Na Figura 18 são ilustradas as componentes determinadas neste procedimento.

FIGURA 17 – EXEMPLOS DOS PROCEDIMENTOS DE CAMPO NA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE GUARAQUEÇABA (RESERVA NATURAL DE SALTO MORATO)

(a) RASTREIO GNSS SOBRE PIQUETE; (b) USO DE ESTAÇÃO TOTAL PARA LEVANTAMENTO TRIGONOMÉTRICO



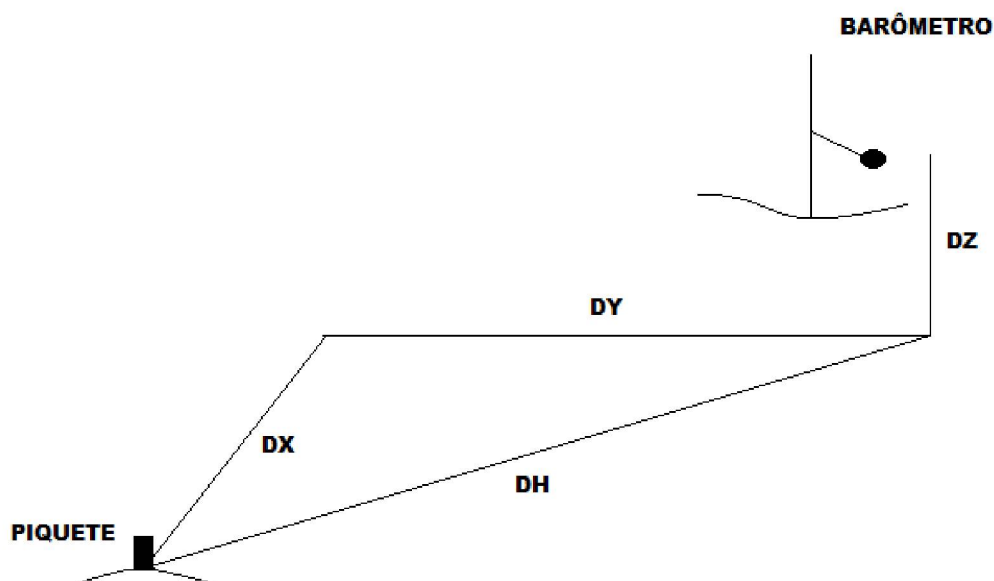
(a)



(b)

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 18 – COMPONENTES TRIDIMENSIONAIS LEVANTADAS ENTRE O PIQUETE E O BARÔMETRO



FONTE: O Autor (2020)

Ao final desta etapa, as altitudes dos barômetros próximos as antenas GNSS já eram conhecidas, calculando-se assim a diferença de altitude entre estes e as estações GNSS, com precisão centimétrica. Na Figura 19 são apresentadas algumas imagens das estações meteorológicas, tomadas na ocasião do rastreamento GNSS próximo a elas, enquanto na Tabela 05 contém as informações dos barômetros. instituto administrador, e a qual estação GNSS o mesmo foi vinculado, contendo ainda as componentes DX , DY (aproximadas), distância horizontal (DH) e DZ entre eles. Esta etapa não foi realizada para a estação NEIA, visto que ela integra a rede RBMC-MET do projeto GNSS-SP (MONICO, 2006), onde estações meteorológicas são ligadas diretamente nos receptores, nesse caso uma estação meteorológica Vaissala PTU 300, sendo os dados meteorológicos disponibilizados gratuitamente pelo FTP do IBGE, juntamente com o arquivo RINEX. A estação GNSS SCAQ foi vinculada a duas estações meteorológicas distintas, pois a estação mais próxima (Araquari/IFC) precisou ser enviada para a manutenção, não registrando observações a partir das 13 h do dia 27 de novembro de 2019.

FIGURA 19 – EXEMPLOS DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS VINCULADAS
(a) PARANAGUÁ/SIMEPAR; (b) CURITIBA/INMET; (c) BARRA DO SUL/EPAGRI



FONTE: O Autor (2020)

TABELA 05 – INFORMAÇÕES SOBRE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Estação Meteorológica	Órgão Administrador	Estação GNSS vinculada	DX (m), DY (m), DZ (m)	DH (m)
Cananéia	IBGE/UNESP	NEIA	0,00 ; 0,00 ; 0,00	0,00
Curitiba	INMET	UFPR	20,66 ; -42,59 ; 0,06	47,35
Piraquara	SANEPAR	PIR	-25,68 ; 13,55 ; -1,63	29,04
Antonina	SIMEPAR	ANT	1.682,79 ; -1.243,99 ; -7,28	2.092,68
Paranaguá	SIMEPAR	CEM	-17.793,22 ; 4.405,47 ; 4,08	18.505,27
Araquari	IFC	SCAQ	-89,26 ; 106,64 ; -4,73	139,07
Barra do Sul	EPAGRI	SCAQ	11.494,29 ; -10.589,23 ; -8,39	15.628,52

FONTE: O Autor (2020)

A conversão do valor de pressão dos barômetros para as respectivas alturas das estações elementares e de verificação foi realizada a partir da equação hypsométrica (equação 3.1), já validada para aplicações geodésicas por Boehm (2004). Tal equação expressa a variação da pressão atmosférica em função da altitude, e consecutivamente permite a redução de um determinado valor obtido para uma altura pré-definida.

$$h_2 - h_1 = 29,3 * T * \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad , \quad (3.1)$$

sendo:

h_1 e h_2 as altitudes respectivas aos pontos 1 e 2 envolvidos na transformação, em metros;

T a temperatura média entre os pontos, em Kelvin ($^{\circ}K$);

p_1 e p_2 os respectivos valores de pressão dos pontos 1 e 2, em hPa ; e

o valor de 29,3 é dado em $m.^{\circ}K^{-1}$, pois representa a constante do gás para o ar seco ($287,0538 J.kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$), dividido pela aceleração da gravidade ($9,784 m.s^{-2}$).

Por meio da equação 3.1, é possível saber que uma variação de 1 m em altitude pode ocasionar diferenças de 0,125 hPa. Adotando-se o posicionamento absoluto para tomada de altitudes dos sensores barométricos, erros em altitude de até 25 m poderiam estar embutidos dentro da metodologia, significando erros de 3,13 hPa, que por sua vez ocasionariam erros de até 10 mm na estimativa de água precipitável. Esse procedimento afetaria consideravelmente os resultados obtidos na modelagem, motivo pelo qual a etapa de obtenção de altitude dos barômetros foi efetuada por técnica que produz resultados mais precisos.

3.3 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO PWV USANDO O PPP-IBGE

Preliminarmente ao uso dos dados de atraso zenital fornecidos pela aplicação PPP-IBGE, idealizou-se investigar a eficácia de seus valores em comparação a resultados obtidos por meio de software científico tradicional para posicionamento de alta precisão. Deste modo, foi possível validar a metodologia do IBGE para se obter o ZTD, e saber se o algoritmo poderia ser aproveitado para as finalidades discutidas.

O software científico definido para processamento dos dados de referência foi o Software de Processamento GNSS *Bernese*, versão 5.2. Este é um software globalmente conhecido, e tido como referência para processamento GNSS de alta precisão, contendo métodos e modelos avançados para tratamento de dados e minimização ou correção de erros em observáveis GNSS (Dach *et. al.*, 2015). O mesmo também pode ser obtido para se estimar parâmetros atmosféricos, geodinâmicos e efemérides precisas. Outra finalidade é processamento de dados SLR (*Satellite Laser Ranging*).

Para esta etapa de teste foram aproveitados dados da primeira semana do período de campo, para as estações NEIA, UFPR e SCAQ, ou seja, entre 00h do dia 12 de novembro de 2019 e 00h do dia 19 de novembro de 2019, com o mesmo intervalo de dados de 1 min. Cada arquivo RINEX diário foi submetido para processamento pelo *Bernese*, resultando em arquivos .trop, contendo as informações de atraso zenital total, atraso zenital hidrostático e atraso zenital úmido e também os valores de gradientes troposféricos.

De modo a se manter fiel a metodologia já apresentada, os valores ZTD-Bernese foram empregados para se obter valores PWV pelo mesmo procedimento descrito na seção anterior, inclusive, vinculando-se aos dados das mesmas estações meteorológicas. Por fim, os dados PWV-Bernese foram usados como referência para avaliar a acurácia dos valores PWV-IBGE. A metodologia de análise envolveu o cálculo dos coeficientes de determinação (R^2) calculados entre os dois conjuntos de dados (referência e testado) de cada estação, para verificar o quanto eles se aproximam de um modelo linear. Quanto mais próximo de 100%, mais linear é o modelo, e maior o grau de compatibilidade entre os conjuntos.

Como auxílio também foram computados os coeficientes de correlação de Pearson (ρ), que expressam o grau de correlação que ambos os conjuntos possuem, podendo variar de -1 a 1, conforme a proporcionalidade dos valores (BUSSAB e MORETTIN, 2017). Coeficiente igual a -1 registra uma proporcionalidade inversa em 100%, significando que enquanto o vapor de água sobre uma estação aumenta em outra estação diminui na mesma proporção; coeficiente igual a 0 significa correlação nula, uma estação não possui nenhuma semelhança a outra; coeficiente 1 indica 100% de proporcionalidade, registrando os mesmos efeitos de variação. Em termos práticos, enquanto R^2 indicará a acurácia do conjunto testado, ρ indicará sua correlação com os dados de referência.

Por fim foi realizada a execução de inferência estatística pelo teste Mann-Whitney (U) bilateral, tendo sido usado para comprovar que os conjuntos amostrais da técnica PPP-IBGE provêm da mesma população que os conjuntos do Bernese. Desta forma, foi possível identificar tendências e ineficiências da técnica analisada. Este teste foi escolhido pois as séries PWV não seguem distribuição normal. A hipótese nula testa se a mediana do conjunto PPP-IBGE é igual a mediana do conjunto Bernese ($H_0: Md_1 = Md_2$), enquanto a hipótese alternativa testa se ambas

são diferentes ($H_1: Md_1 \neq Md_2$). O p-valor do teste foi o parâmetro avaliado para comparação ao nível de significância de 5%, ou seja, caso este parâmetro seja menor que 0,05 significa que o teste foi reprovado a confiança de 95%.

3.4 ANÁLISE DE DISTÂNCIAS PARA VÍNCULO A BARÔMETROS

Conforme apresentado na seção 3.2, a estação CEM foi a única a ter as estimativas do PWV efetuada empregando-se dados de estação meteorológica distante da antena GNSS, especificamente a estação SIMPEAR de Paranaguá, a aproximadamente 18 km. Para analisar o impacto que esta distância pode ocasionar nos resultados desta modelagem, e para servir de referência para outros estudos que empreguem a mesma metodologia, foi realizada uma investigação comparativa dos resultados de PWV obtidos em outras estações preliminarmente escolhidas: ANT, SCAQ e PIR. Para cada um destes pontos, além das séries temporais PWV já modeladas utilizando-se dados de estações meteorológicas próximas, foram obtidas outras duas séries considerando estações meteorológicas com distâncias superiores a 15 km da antena GNSS, sendo 2 estações para cada antena. Na Tabela 06 é apresentada a relação de distâncias das estações meteorológicas empregadas.

TABELA 06 – DISTÂNCIAS E DESNÍVEIS ENTRE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS E ESTAÇÕES GNSS

Estação GNSS	Estação Meteorológica	Distância (km)	Desnível (m)
SCAQ	ARAQUARI	0,139	-4,73
	BARRA	15,628	-8,39
	ITAPOA	35,909	-9,79
ANT	ANTONINA	2,092	-7,28
	PARANAGUA	21,432	-2,74
	GUARAQUECABA	50,665	11,87
PIR	PIRAQUARA	0,029	-1,63
	CURITIBA	16,599	28,33
	ANTONINA	39,106	-890,552

FONTE: O Autor (2020)

Nesta etapa, assim como na anterior, foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) e o p-valor do teste Mann-Whitey. Esta etapa apoiou a decisão de aproveitar a estação SIMEPAR de Paranaguá para o receptor CEM, a qual tem os resultados com a melhor confiabilidade possível para análise de acurácia da interpolação.

3.5 ESTUDO DE HOMOGENEIDADE LOCAL

Esta etapa da pesquisa foi realizada buscando-se avaliar a correlação do PWV obtido pelas diferentes estações GNSS do estudo, e comprovar a homogeneidade dos conjuntos de dados. Ou seja, esperou-se concluir que a região possa ser considerada homogênea em relação a variável vapor d'água.

Para avaliar a semelhança do conjunto de dados foi também utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ), que indicou o percentual de correlação entre as diferentes estações analisadas.

Os padrões na dinâmica dos dados também foram analisados a partir da técnica da Análise das Componentes Principais (ACP). Esta etapa visa estudar os carregamentos e scores resultantes das séries temporais, de modo a verificar se todas as estações apresentam padrões semelhantes de variância, explicada por cada componente, e se apresentam o mesmo comportamento temporal. Como o total de estações estudadas é igual a 6, serão também 6 o número de CPs resultantes. Cada estação GNSS terá um score relacionado a cada CP, e a componente com maior escore será o CP predominante que melhor explica seu conjunto de dados. Caso todas as estações indiquem o mesmo CP predominante, significa que todas as séries temporais representam o mesmo fenômeno, e então as estações podem ser consideradas homogêneas. Do contrário, se uma estação apresenta um CP predominante que difere das demais, esta estará dissociada do grupo, pois não reflete a homogeneidade da região.

Por fim, o teste de homogeneidade regional proposto por Hosking e Wallis (1997) é explorado para investigar as propriedades de semelhança dos conjuntos de

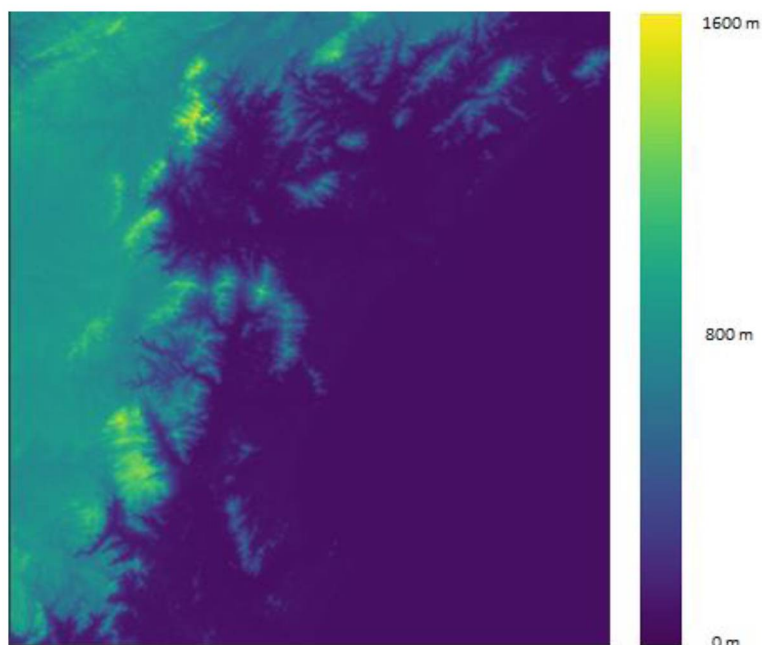
dados, fazendo uso dos momentos abstratos das séries temporais de cada estação. Conforme explicado na seção 3.7, essa análise resulta na medida de heterogeneidade, e deixará evidente se todas as estações podem ser consideradas homogêneas, possivelmente heterogênea ou definitivamente heterogênea, em termos da variável estudada, nesse caso o PWV. O número N de simulações utilizadas foi igual a 500.

3.6 INTERPOLAÇÕES ESPACIAIS

Utilizando-se os valores PWV das estações elementares, foram executados três métodos de interpolação espacial de modo a avaliar a técnica com melhores resultados. O primeiro método avaliado foi o Inverso da Potência das Distâncias (popularmente conhecido por IDW - *Inverse Distance Weighting*), por ser uma técnica de fácil aplicação e ideal para estudos com poucas estações. O ponderador empregado foi 2.

Além do IDW, duas técnicas de krigagem foram implementadas, mesmo, de modo geral, não sendo apropriadas para casos com poucas estações como o presente estudo. Uma delas, a krigagem universal (*Universal Kriging* - UK) que foi aplicada de modo a verificar os resultados baseados em geoestatística com tendência e analisar sua eficiência em comparação ao IDW. Por último, considerando a variação altimétrica da região, foi realizada uma Co-Krigagem Colocalizada, empregando-se a variável altitude (denominada pelo autor de UK-EW, sigla para *Universal Kriging - Elevation Weighting*), onde um Modelo Digital de Terreno (MDT) SRTM de 30 m de resolução (Figura 20) foi usado para obter a altitude de cada ponto interpolado no raster final. Tal ponderação foi considerada importante devido à altura variante da camada neutrosférica na região de interpolação, uma vez que a topografia acidentada apresenta variações em altitude de 0 m até aproximadamente 1.600 m.

FIGURA 20 – MODELO DIGITAL DE TERRENO EMPREGADO NA INTERPOLAÇÃO



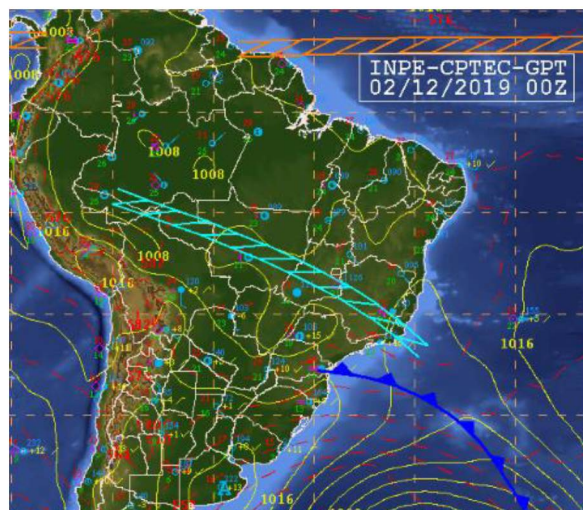
FONTE: NASA (2020)

As três técnicas de interpolação foram realizadas a cada época da série temporal no período da campanha de campo. Os resultados foram analisados utilizando-se os dados PWV obtidos pelas estações de verificação. O p-valor do teste de Mann-Whitney também foi aplicado de forma a avaliar estatisticamente a concordância dos resultados finais de raster interpolados.

3.7 IDENTIFICAÇÃO DE PASSAGEM DE FRENTES

A série temporal para o centro da Serra da Graciosa, obtida por interpolação, foi explorada para o estudo da viabilidade de identificação de padrões durante a ocorrência de uma passagem de frentes. Para isso a série temporal foi comparada com cartas sinóticas de superfície (Figura 21) elaboradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), encontradas no seguinte endereço eletrônico <https://tempo.cptec.inpe.br/>. Por meio de tais cartas, elaboradas a cada 6h, pode-se detectar a dinâmica de passagem de frentes sobre a região, permitindo investigar o comportamento do PWV na série temporal em questão durante a ocorrência destes fenômenos. A dinâmica espacial do vapor d'água também é analisada a partir da série de rasters obtidos pela técnica de interpolação, de modo a verificar se a distribuição PWV é coerente com a dinâmica de massas apontada pelas cartas.

FIGURA 21 – EXEMPLO DE CARTA SINÓPTICA DO INPE PARA O DIA 02/12/2019



FONTE: INPE (2020)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PPP-IBGE PARA PWV

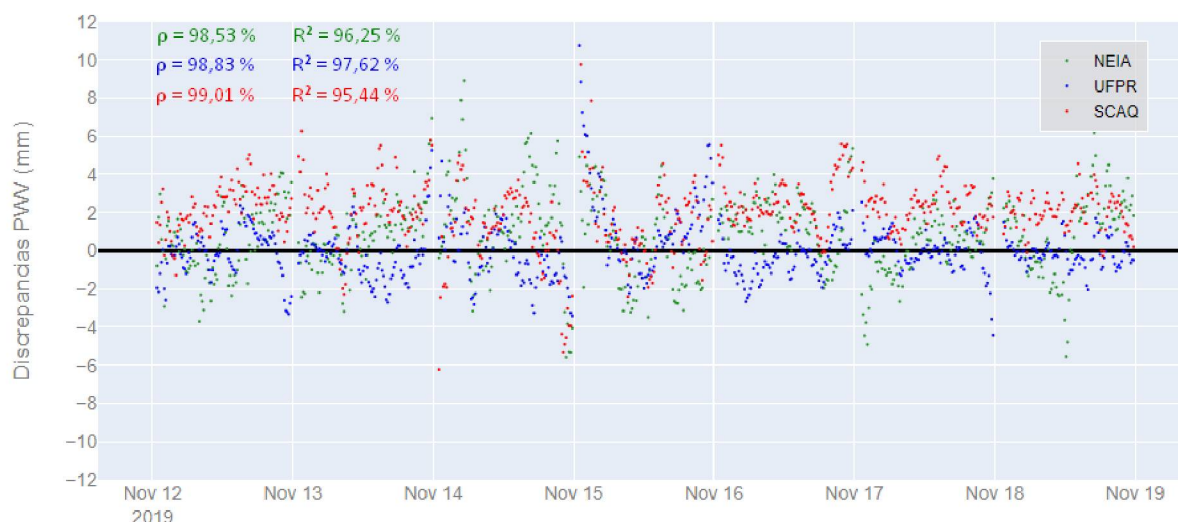
As séries de dados obtidas para as estações elementares usando-se a aplicação PPP-IBGE foram comparadas por diferenças com as séries geradas por meio do software científico *Bernese*®, gerando-se três séries temporais de discrepâncias, uma para cada estação. Os três conjuntos tiveram 639 amostras, e o resumo estatístico dos módulos das diferenças pode ser verificado na Tabela 07. São apresentados para cada série o número de amostras, a média, o desvio padrão, os valores mínimo e máximo, os valores de percentis a 25%, 50% (mediana) e 75%, a raiz do erro médio quadrático e o *p*-valor para o teste *t Student*. Na Figura 22 são mostradas as séries de discrepâncias PWV-GNSS plotadas em função da época de observação.

TABELA 07 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS (PPP-IBGE VERSUS BERNESE)

	NEIA	SCAQ	UFPR
Número de Amostras	639	639	639
Média (mm)	1,77	2,24	1,06
Desvio Padrão (mm)	1,35	1,37	1,12
Mínimo (mm)	0,00	0,00	0,00
Percentil 25% (mm)	0,78	1,35	0,35
Percentil 50% (mm)	1,52	2,14	0,78
Percentil 75% (mm)	2,42	2,91	1,42
Máximo (mm)	8,91	13,34	10,76
REMQ (mm)	2,22	2,62	1,54

FONTE: O Autor (2020)

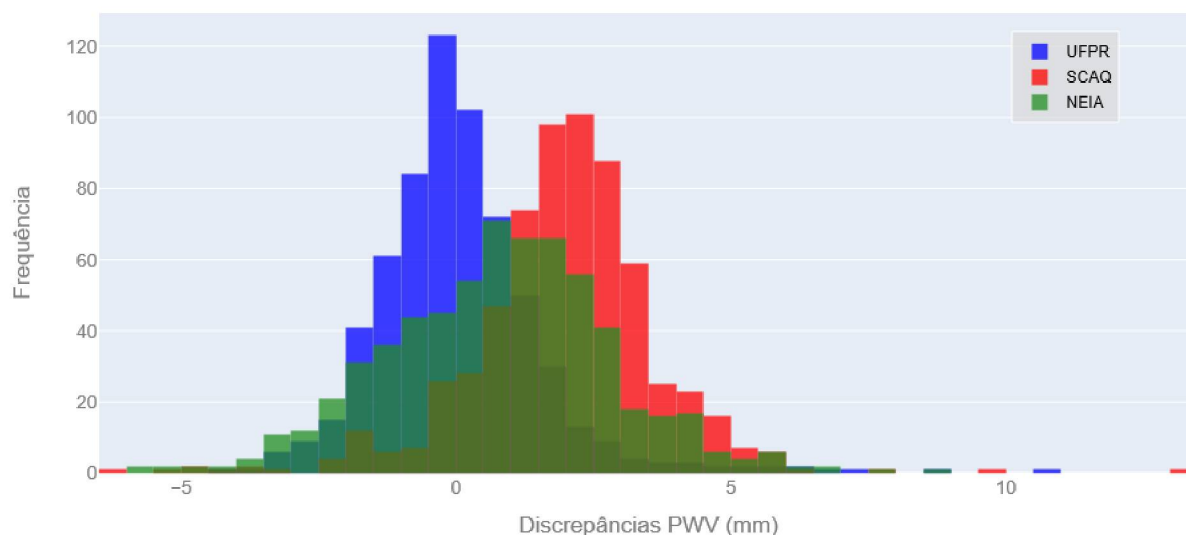
FIGURA 22 – DISCREPÂNCIAS PWW-GNSS (PPP-IBGE VERSUS BERNESE)



FONTE: O Autor (2020)

Por meio dos valores apresentados pode-se verificar que as discrepâncias (em módulo de PWW obtidos pelos dois métodos de processamento chegaram até 13,34 mm, estando bem acima do valor de referência esperado (2 mm). Entretanto, para as três estações, a maioria dos valores esteve abaixo de 3 mm, levando em consideração o percentil de 75%, o que dá a entender que de fato as discrepâncias acima deste valor são minoria. Deste modo, as respectivas médias para NEIA, SCAQ e PIR foram 1,77 mm, 2,24 mm e 1,06 mm, com seus REMQ (Raiz do Erro Médio Quadrático) iguais a 2,22 mm, 2,62 mm e 1,54 mm, respectivamente. Ressalta-se como a média e REMQ da estação SCAQ esteve acima das demais. Dos três conjuntos SCAQ é a que obteve maior correlação com os dados do software Bernese (vide coeficiente de Pearson na Figura 22), mas também a que teve pior Coeficiente de Determinação. Isso significa que seus dados são os mais precisos, mas não os mais acurados, por haver tendência em relação aos valores de referência. De fato, isso pode ser observado na Figura 22, onde percebe-se como seus valores flutuaram em torno de 2 mm e não de 0 mm. Como meio de analisar se de fato existe tal tendência, foram plotados os histogramas dos conjuntos de discrepâncias (Figura 23). Na Tabela 08 são apresentados os valores do teste *U* (Mann-Whitney).

FIGURA 23 – HISTOGRAMAS (VALIDAÇÃO PPP-IBGE)



FONTE: O Autor (2020)

TABELA 08 – RESULTADOS DA ESTATÍSTICA U PARA VALIDAÇÃO DO PPP-IBGE

Estação	Estatística U	p -valor
NEIA	195156.0	0,08
SCAQ	178152.0	4,03e-5
UFPR	203403.0	0.45

FONTE: O Autor (2020)

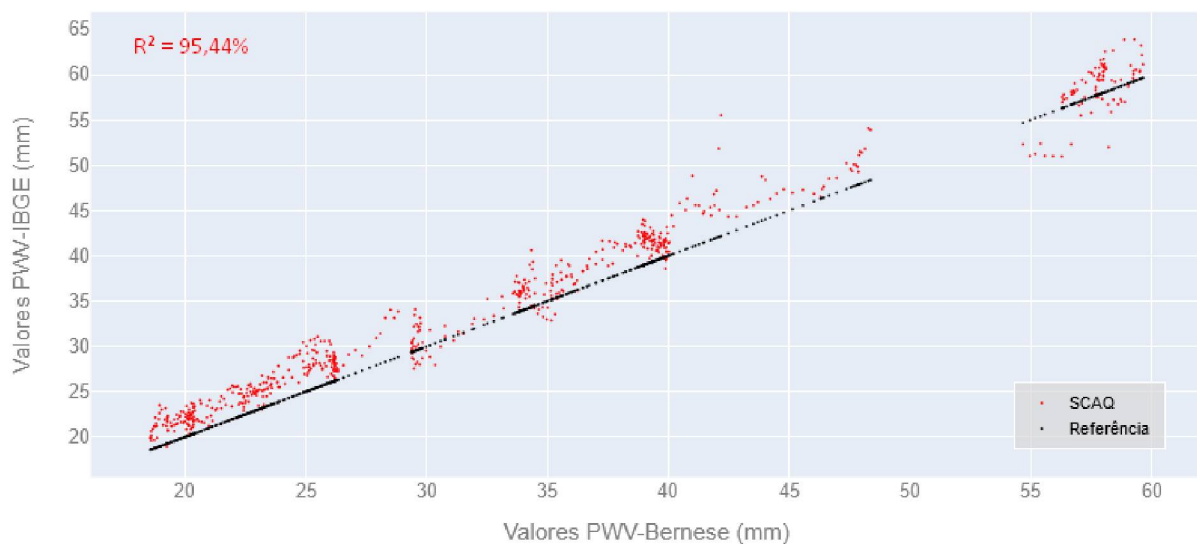
A Figura 24 permite verificar que todos os conjuntos obtidos pelo PPP-IBGE possuem uma tendência, mesmo que em graus distintos. Enquanto a estação UFPR apresentou a menor tendência, com valores geralmente menores que os do *Bernese* (tendência de discrepâncias ao negativo), as estações NEIA e SCAQ apresentaram valores geralmente maiores (tendência de discrepâncias ao positivo), sendo a tendência de SCAQ a mais considerável. Como observado pelo p -valor de Mann-Whitney, UFPR e NEIA não sofreram impactos significativos a confiança de 95%, porém SCAQ teve seus valores rejeitados pelo teste, pois sua tendência foi considerada estatisticamente relevante, indicando valores PWV superestimados. Não foi possível identificar o motivo das estimativas PPP-IBGE terem um desempenho menor para esta estação. Testes mais aprofundados devem ser efetuados com o objetivo de identificar e minimizar essas discrepâncias.

A Figura 24 ilustra os gráficos dos valores PWV de referência (*Bernese*®) e aqueles obtidos pelo PPP-IBGE, apresentando ainda o coeficiente de determinação (R^2) para cada estação. As tendências discutidas podem novamente ser observadas,

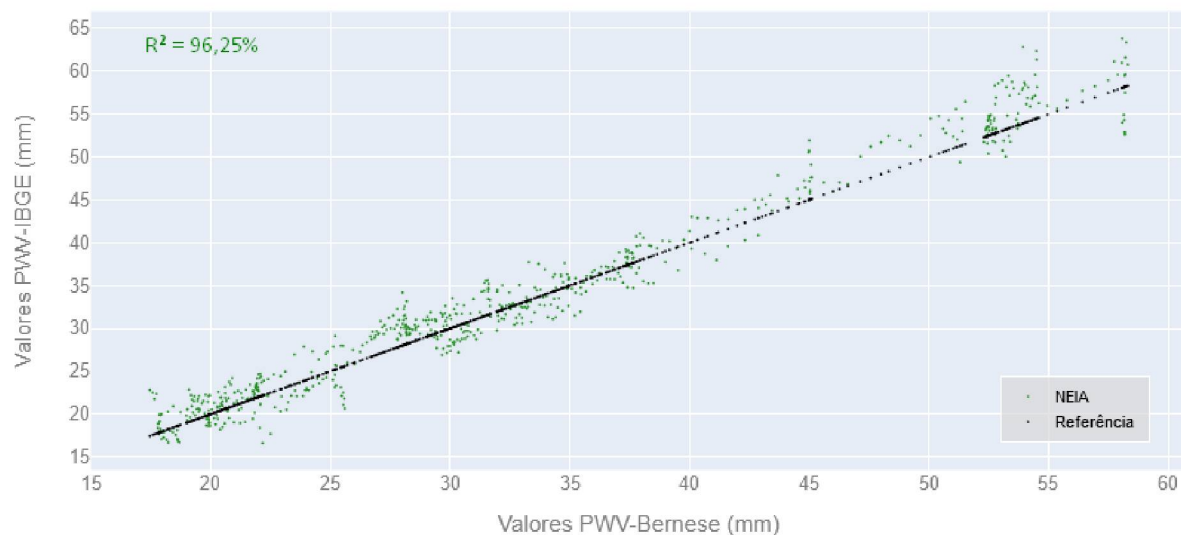
facilmente para a estação SCAQ, sutilmente para a estação NEIA e quase não identificável na estação UFPR. Entretanto os valores de R^2 , respectivamente iguais a 95,44%, 96,25% e 97,61% provam que apesar das tendências apresentadas, os dados testados e de referência possuem forte similaridade em ambas as estações, considerando o fato de que a estação SCAQ pode ter padrões troposféricos diferentes das demais, uma vez que a modelagem do PPP-IBGE apresenta tendências nas suas estimativas ZTD para esta estação.

FIGURA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS AVALIADOS E DE REFERÊNCIA (VALIDAÇÃO PPP-IBGE)

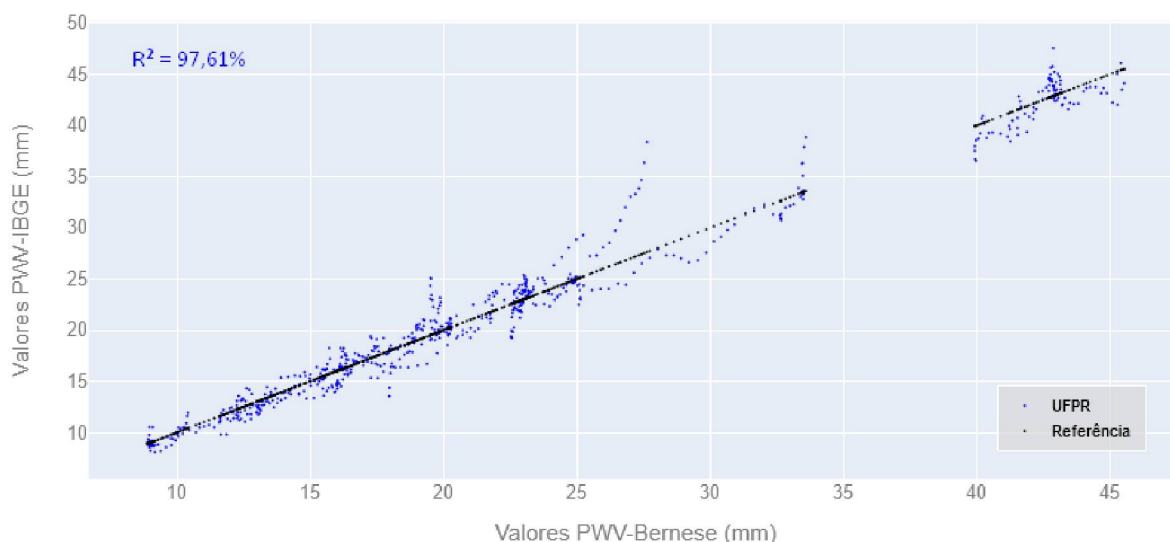
a) ESTAÇÃO SCAQ; b) ESTAÇÃO NEIA; c) ESTAÇÃO UFPR



(a)



(b)



(c)

Fonte: O Autor (2020)

4.2 IMPACTO DA DISTÂNCIA DO BAROMETRO NA QUALIDADE DO PWV

Os dados de PWV provenientes da campanha de campo nas estações PIR, ANT e SCAQ geraram três diferentes séries temporais cada, vinculando-as a três estações meteorológicas distintas. Por referência, as séries temporais adotadas como corretas foram aquelas cuja modelagem foi realizada a partir dos dados da estação meteorológica mais próxima, ou seja, Araquari-IFC para SCAQ, Antonina-SIMEPAR para ANT e Piraquara-SANEPAR para PIR. As outras séries, obtidas pelas duas estações meteorológicas mais distantes de cada estação GNSS (conforme Tabela 6), foram objetos de estudo. Os valores de cada série tiveram suas diferenças calculadas em relação aos valores de referência, gerando-se séries de discrepâncias.

4.2.1 Análise SCAQ

Para a estação SCAQ as discrepâncias são respectivas as estações de Barra do Sul/EPAGRI a 15,62 km e Itapoá/INMET a 35,90 km, e os descritores estatísticos podem ser observados na Tabela 09. Os gráficos de discrepâncias são apresentados na Figura 25, apresentando ainda o coeficiente de determinação e o coeficiente de correlação de cada série em relação aos valores de referência.

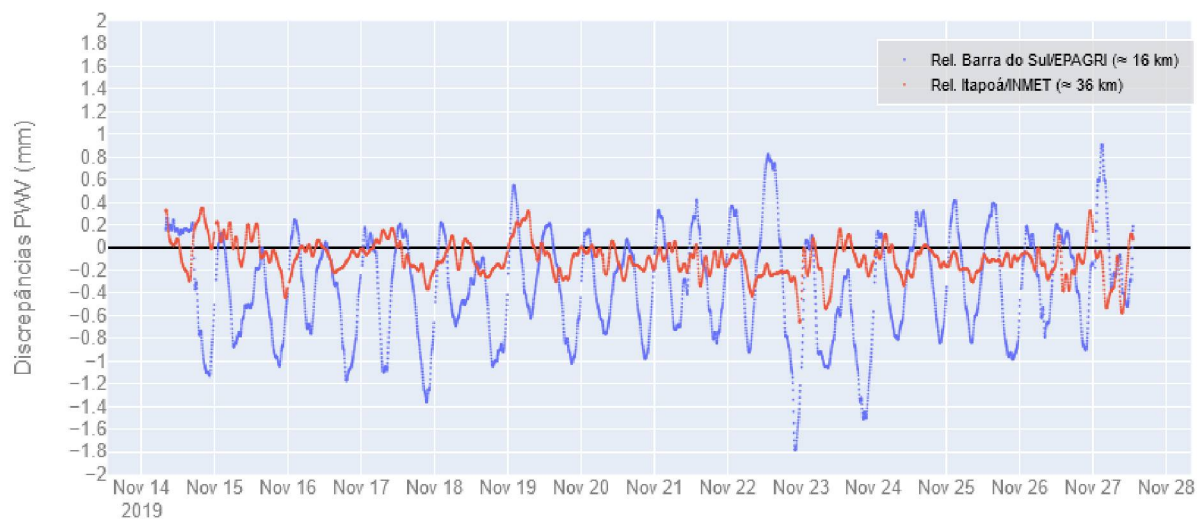
TABELA 09 – RESUMO ESTATÍSTICO DAS DISCREPÂNCIAS PARA SCAQ (VÍNCULO A BARÔMETROS)

	Barra do Sul/EPAGRI	Itapoá/INMET
Número de Amostras	3749	3749
Média (mm)	0,46	0,14
Desvio Padrão (mm)	0,35	0,11
Mínimo (mm)	0,00	0,00
Percentil 25% (mm)	0,16	0,06
Percentil 50% (mm)	0,38	0,13
Percentil 75% (mm)	0,72	0,21
Máximo (mm)	1,79	0,66
REMQ (mm)	0,58	0,18
Estatística U	6858545,0	6974270,0
p-valor	0,03	0,28

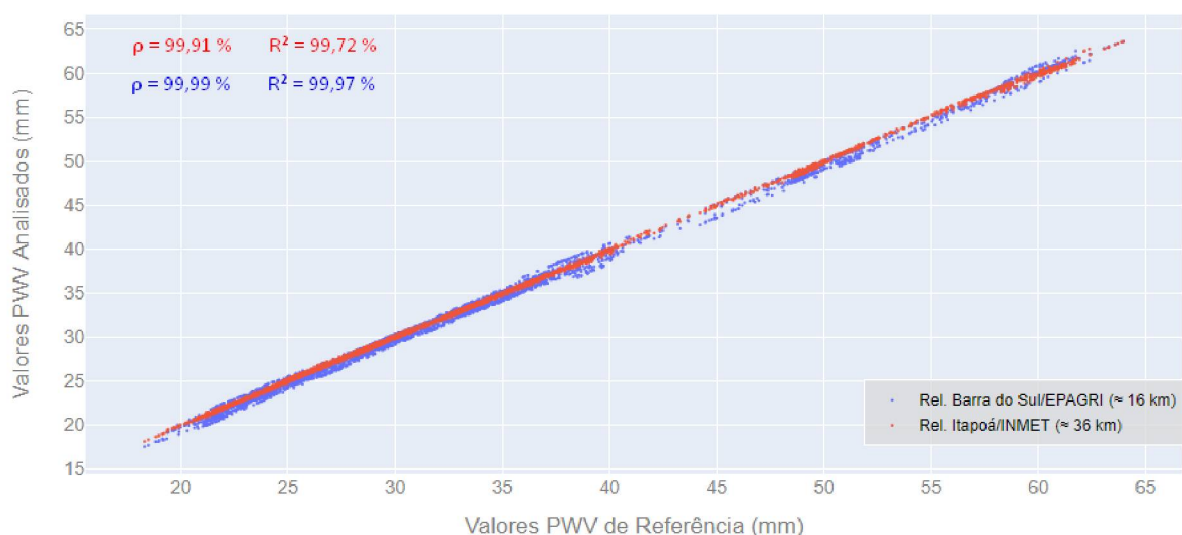
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 25 – DISCREPÂNCIAS DE PWV PARA A ESTAÇÃO SCAQ

(a) DIFERENÇAS POR ÉPOCA (b) REGRESSÃO LINEAR COM PWV DE REFERÊNCIA



(a)



(b)

FONTE: O Autor (2020)

Primeiramente ressalta-se que este conjunto de dados é menor que os demais devido a estação de Araquari/IFC ter dados apenas até as 13 h do dia 27 de novembro de 2019. Por este motivo o número total de amostras foi de 3.749. A média do módulo das discrepâncias foi de 0,46 mm para Barra do Sul/EPAGRI e 0,14 mm para Itapoá/INMET, com desvios padrão iguais a 0,35 mm e 0,11 mm, respectivamente. Tanto pelos valores de máximo quanto pelos valores de percentis é possível verificar que as discrepâncias foram significativamente menores para a estação Itapoá/INMET, o que também pode ser observado na Figura 25, sendo que para esta estação o valor máximo em módulo foi de 0,66 mm enquanto para a outra foi de 1,79 mm. A raiz do erro médio quadrático foi igual a 0,18 mm para Itapoá/INMET, enquanto para Barra do Sul/EPAGRI foi de 0,58 mm. O valor de R^2 mostra que a série de dados desta última, mesmo que muito próximos dos valores de referência (99,72%) foram 0,25% pior que os resultados de Itapoá/INMET (99,97%). Ambos foram aceitos pelo teste U de Mann-Whitney, entretanto apenas com significância de 3% para Barra do Sul/EPAGRI, o que significa que esta estação, por mais que esteja mais próxima, apresenta resultados piores para estimativa PWV. Isso indica que a distância não é determinante para o vínculo e sim a coerência atmosférica entre as estações, ou seja, sensibilidades semelhantes às mudanças do tempo.

Em face de tais resultados, os períodos em que houveram lacuna de observações na estação Araquari/IFC (a partir de 13 h 15 min do dia 27 de novembro

de 2019), os mesmos foram substituídos pelos dados da estação Itapoá/INMET, que apresentou melhores resultados.

4.2.2 Análise ANT

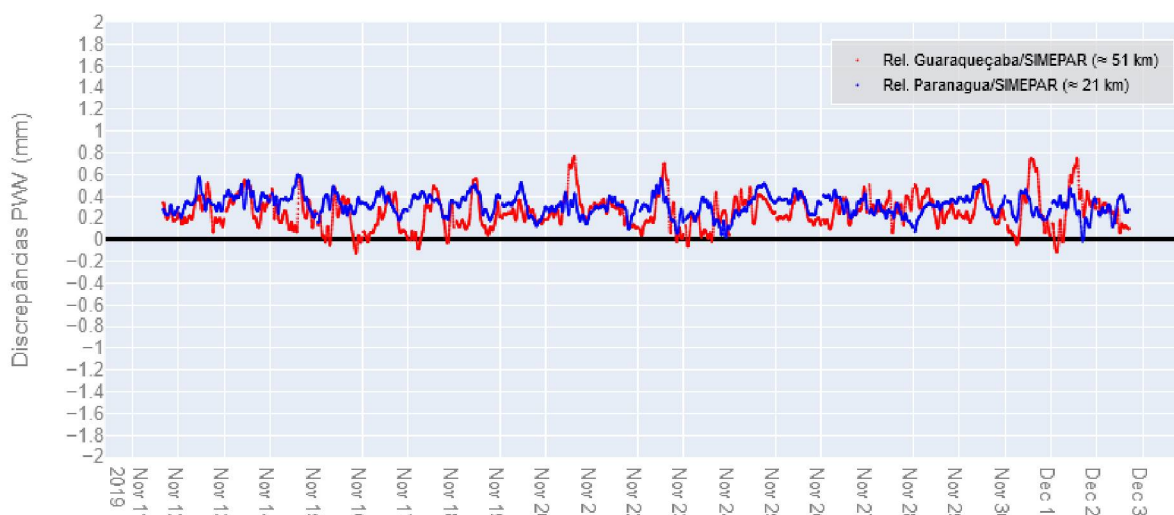
Para a análise efetuada na estação ANT, o conjunto de dados teve 5.817 amostras e as discrepâncias foram calculadas a partir de observações meteorológicas das estações Guaraqueçaba e Paranaguá, ambas do SIMEPAR. A Tabela 10 contém o resumo estatístico, enquanto a Figura 26 ilustra as discrepâncias de cada conjunto.

TABELA 10 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS PARA ANT (VÍNCULO A BARÔMETROS)

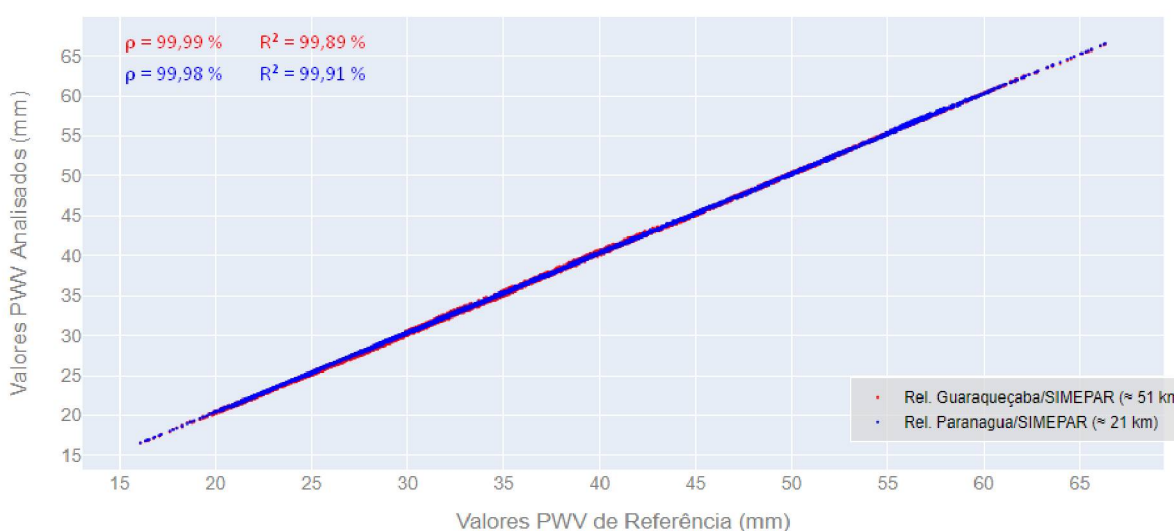
	ANT	
	Paranaguá/SIMEPAR	Guaraqueçaba/SIMEPAR
	R	R
Número de Amostras	5817	5817
Média (mm)	0,32	0,26
Desvio Padrão (mm)	0,09	0,15
Mínimo (mm)	0,00	0,00
Percentil (25%) (mm)	0,25	0,16
Percentil (50%) (mm)	0,32	0,25
Percentil (75%) (mm)	0,38	0,34
Máximo (mm)	0,60	0,77
REMQ (mm)	0,33	0,29
Estatística U	16578246,0	16647137,0
<i>p</i> -valor	0,03	0,07

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 26 – DISCREPÂNCIAS DE PWV-GNSS PARA A ESTAÇÃO ANT
(a) DIFERENÇAS POR ÉPOCA (b) REGRESSÃO LINEAR COM PWV DE REFERÊNCIA



(a)



(b)

FONTE: O Autor (2020)

Assim como no cenário anterior, este caso também apresentou situação onde a estação meteorológica mais distante gerou resultados melhores que a estação mais próxima. Pela figura 26a foi verificado que as discrepâncias de PWV obtidos com a estação Paranaguá tiveram menor desvio padrão (0,09 mm), mas apresentou uma tendência mais significativa, mantendo sua média (0,32 mm) acima da média 0,26 mm obtida pela estação de Guaraqueçaba. Pode-se perceber isto pelo fato do valor máximo desta última ser igual a 0,77 mm, ligeiramente menor que a outra (máximo de 0,60 mm), mas o REMQ manter-se abaixo, com 0,29 mm e 0,33 mm, respectivamente. Percebe-se que estas diferenças são sutis, o que é comprovado ao analisar o gráfico da figura 26b, sendo a diferença de R^2 apenas de 0,02%. O teste U

indicou rejeição da hipótese nula, a um nível de 5% de significância, para a estação Paranaguá, mas aceitação ao nível de 3%.

4.2.3 Análise PIR

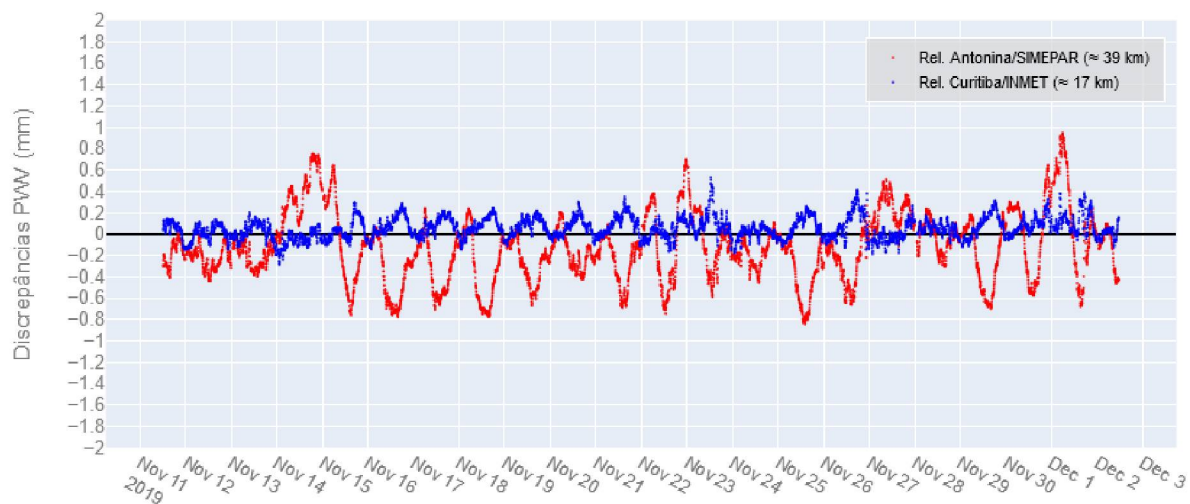
Os resultados da estação PIR, por sua vez, foram condizentes com o que era esperado, sendo que a estação Curitiba/INMET, a 16,60 km, apresentou resultados melhores que a estação Antonina/SIMEPAR, a 39,10 km. Os conjuntos foram de 5.861 amostras e seus resultados podem ser visualizados na Tabela 11 e Figura 27.

TABELA 11 – RESUMO DE DISCREPÂNCIAS PWV-GNSS PARA PIR (VÍNCULO A BARÔMETROS)

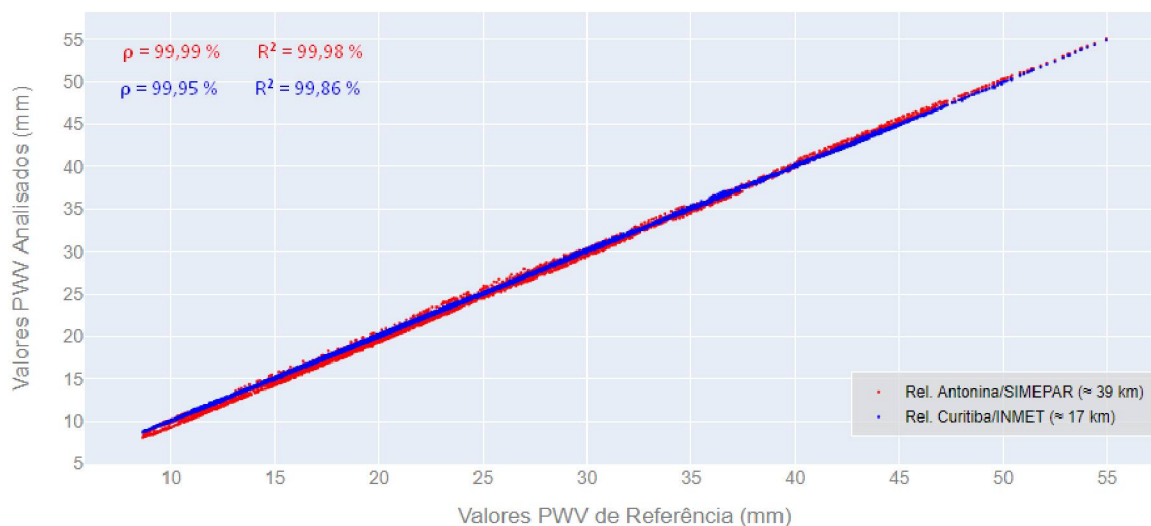
	PIR	
	Curitiba/INMET	Antonina/SIMEPAR
Número de Amostras	5861	5861
Média (mm)	0,09	0,28
Desvio Padrão (mm)	0,07	0,21
Mínimo (mm)	0,00	0,00
Percentil 25% (mm)	0,03	0,11
Percentil 50% (mm)	0,07	0,24
Percentil 75% (mm)	0,13	0,41
Máximo (mm)	0,53	0,95
REMQ (mm)	0,11	0,34
Estatística U	17101452,0	16960284,0
p-valor	0,34	0,11

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 27 – DISCREPÂNCIAS DE PWV-GNSS PARA A ESTAÇÃO PIR
(a) DIFERENÇAS POR ÉPOCA (b) REGRESSÃO LINEAR COM PWV DE REFERÊNCIA



(a)



(b)

FONTE: O Autor (2020)

Neste caso, a hipótese nula teve aceitação para ambos os casos, sendo o melhor caso o conjunto de discrepâncias obtidas com a estação Curitiba/INMET. A média desse conjunto foi de 0,09 mm, com desvio padrão de 0,07 mm e REMQ igual a 0,11 mm. Para a outra estação a média foi igual a 0,28 mm, com desvio padrão de 0,21 mm e REMQ de 0,34 mm. Pela figura 39(a) pode-se perceber que nenhum caso apresentou tendência, e o valor máximo em módulo foi de 0,53 mm e 0,95 mm, respectivamente para as estações citadas. Sabe-se também que a diferença de altitude entre as estações (Antonina/SIMEPAR tem -890,55 m de diferença em altitude em relação a PIR, ao passo que Curitiba/INMET tem +28,33 m) é um fato que pode ter contribuído para estes resultados, mesmo que os valores de pressão tenham

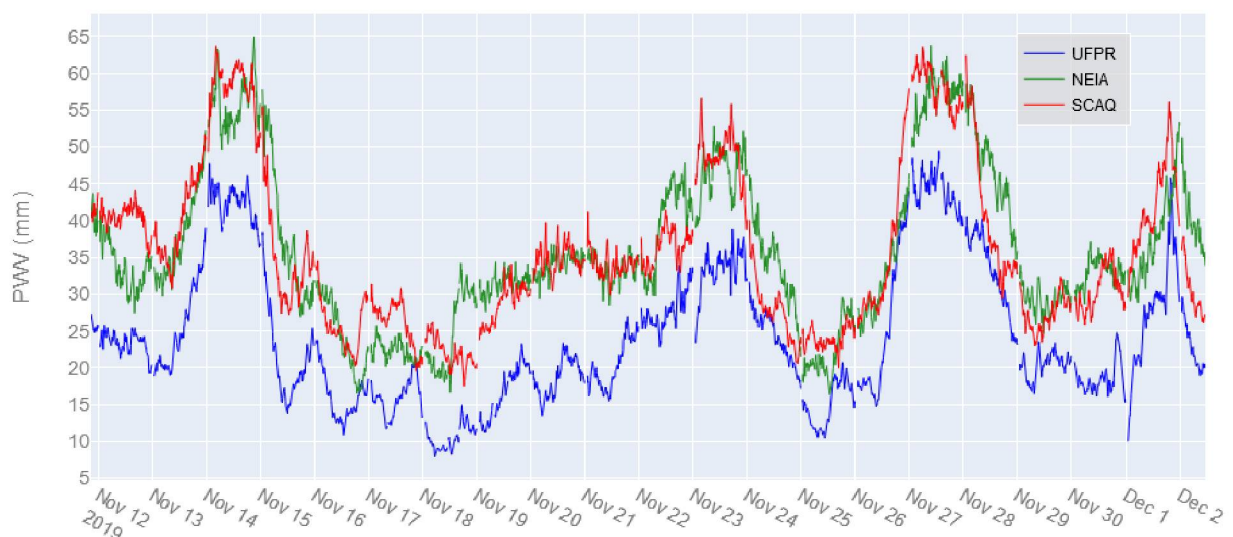
sido corrigidos da diferença de altitude. Entretanto, sendo que ambos os testes foram validados pelo teste estatístico, fica comprovado que usando-se dados meteorológicos de uma estação a uma distância de até 40 km da antena GNSS, e com uma diferença de elevação de 900 m, os resultados não serão significativamente impactados, desde que haja devida correção de pressão devido a diferença de altitude.

Tendo em vista os resultados acima descritos, não foram encontrados problemas na utilização de estação meteorológica até 40 km para vínculo a estação GNSS CEM durante os períodos da campanha de campo. A modelagem PWV para esta estação foi então realizada empregando-se os dados meteorológicos de Paranaguá/SIMEPAR.

4.3 PARÂMETROS DE HOMOGENEIDADE REGIONAL

Após obter os dados temporais ZTD para todo o período de levantamento contínuo em campo, e para cada uma das 6 estações utilizadas, tais séries foram reduzidas a valores de PWV a partir dos dados de temperatura e pressão atmosférica dos barômetros. Na Figura 28 podem ser observadas as séries temporais do vapor d'água para as estações elementares e de verificação.

FIGURA 28 – SÉRIES TEMPORAIS PWV-GNSS
(a) ESTAÇÕES ELEMENTARES (b) ESTAÇÕES DE VERIFICAÇÃO



(a)



(b)

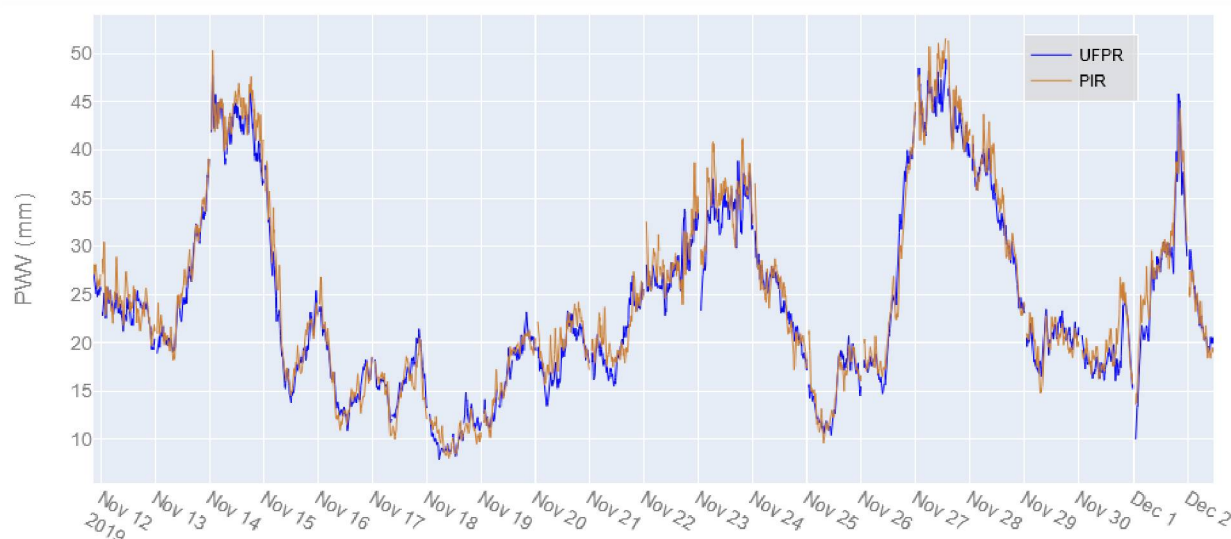
FONTE: O Autor (2020)

O comportamento da dinâmica temporal de PWV foi similar para todas as estações analisadas. É possível verificar como o crescimento e a diminuição da quantidade de vapor d'água ao longo do tempo ocorreu quase que simultaneamente nos pontos, e, com exceção das estações UFPR e PIR, os valores da variável estiveram próximos. Estas duas últimas estações forneceram valores ligeiramente menores, em média 11,48 mm abaixo das demais, mas os resultados similares entre elas são similares. Essa diferença de valores se deve a diferença de altitude entre as estações. As estações UFPR e PIR possuem altitude elipsoidal - altitude com referência ao elipsóide de revolução WGS84, obtida por meio do GNSS - iguais a 925,88 m e 897,61 m, respectivamente, e se encontram a pelo menos 880,31 m acima das outras estações. Fato este que torna compreensível a diferença de valores de vapor detectado, uma vez que a espessura da coluna neutrosférica é ligeiramente menor. Na Figura 29 fica evidente a similaridade entre os dados das estações localizadas no litoral e a similaridade entre as estações de maiores altitudes.

FIGURA 29 – SÉRIES TEMPORAIS PWW-GNSS SEPARADAS POR GRUPOS DE ALTITUDE
(a) ESTAÇÕES LITORÂNEAS (b) ESTAÇÕES DE MAIORES ALTITUDES



(a)



(b)

FONTE: O Autor (2020)

Em termos estatísticos, as características de cada conjunto de dados são apresentadas na Tabela 12. É possível verificar que as médias dos conjuntos das estações UFPR e PIR estão mais próximas entre si, e inferiores aquelas obtidas para as demais estações (cerca de 40%). Do mesmo modo, os valores de mínimo e máximo, assim como os percentis, também apresentam esse afastamento. Ainda para estas estações, seus respectivos desvios padrão, que apresentam média de 9,47 mm, por sua vez, apresentam valores muito próximos aos das outras estações

(que indicam média de 10,47 mm). Isto significa que, apesar do afastamento sistemático existente entre as estações litorâneas e as de maiores altitudes, suas variações permanecem similares. Este fato indica que a dinâmica troposférica das massas de ar possuem, de modo geral, o mesmo efeito sobre as todas as estações investigadas em termos de vapor d'água.

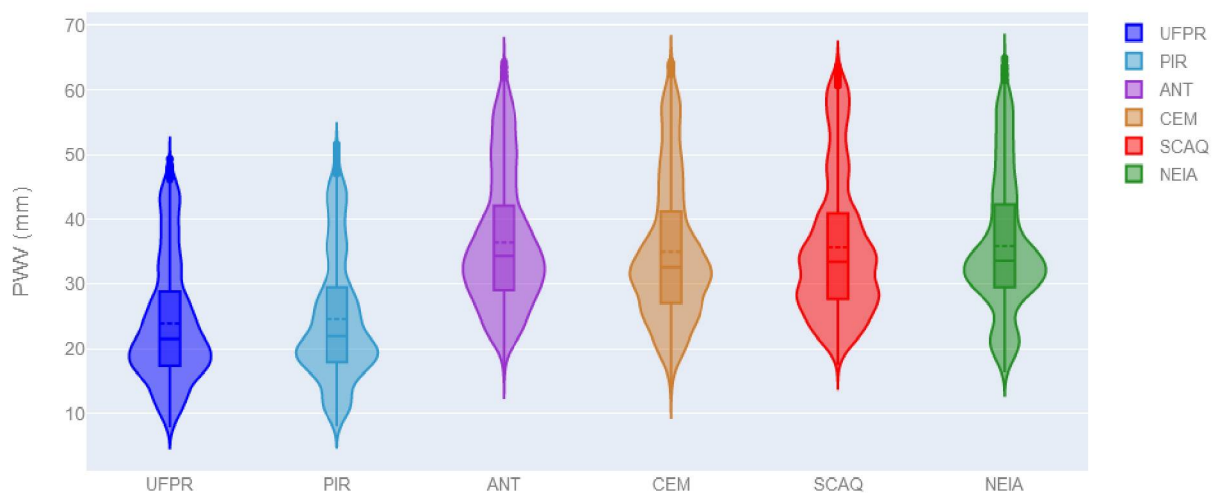
TABELA 12 – DESCRITORES ESTATÍSTICOS DOS CONJUNTOS PWV-GNSS

	Estações Elementares			Estações de Verificação		
	UFPR	NEIA	SCAQ	PIR	ANT	CEM
Número de Amostras	5632	5632	5632	5632	5632	5632
Média (mm)	23,96	35,85	35,65	24,55	36,42	35,00
Desvio Padrão (mm)	9,30	10,44	10,74	9,68	10,06	10,73
Mínimo (mm)	7,89	16,35	17,48	8,04	16,10	13,26
Percentil 25% (mm)	17,38	29,55	27,68	17,91	29,09	27,08
Percentil 50% (mm)	21,53	33,60	33,45	21,94	34,36	32,61
Percentil 75% (mm)	28,90	42,33	40,88	29,54	42,16	41,18
Máximo (mm)	49,41	64,93	63,73	51,57	64,35	64,36

FONTE: O Autor (2020)

Foram produzidos *Violin Plots* (gráficos de violino) que conduziram uma melhor análise da distribuição de dados em cada conjunto. Na Figura 30, a forma dos violinos representa a distribuição dos valores das séries, as caixas representam intervalos de quartis e as linhas contínuas e tracejadas ao centro da caixa representam, respectivamente, a média e a mediana do conjunto.

FIGURA 30 – GRÁFICOS DE VIOLINO PARA CADA ESTAÇÃO GNSS



FONTE: O Autor (2020)

A comparação visual dos gráficos apresentados na Figura 30 torna possível compreender os diferentes padrões em cada região da área de estudo, a partir das diferentes formas dos violinos obtidos para cada estação. Fica claro que nenhuma das estações possui conjunto de dados com distribuição normal (motivo pelo qual foi necessário testes estatísticos não-paramétricos para análise), mas uma distribuição mais alongada próxima ao extremo máximo do conjunto, enquanto o extremo mínimo esteve mais próximo da média. Esse alongamento também representa os sucessivos crescimentos e imediatas reduções na quantidade do vapor d'água, sempre apresentando picos côncavos, mas raramente picos convexos, ou seja, não há picos tendendo ao valor mínimo (isso pode ser verificado nas figuras 28 e 29).

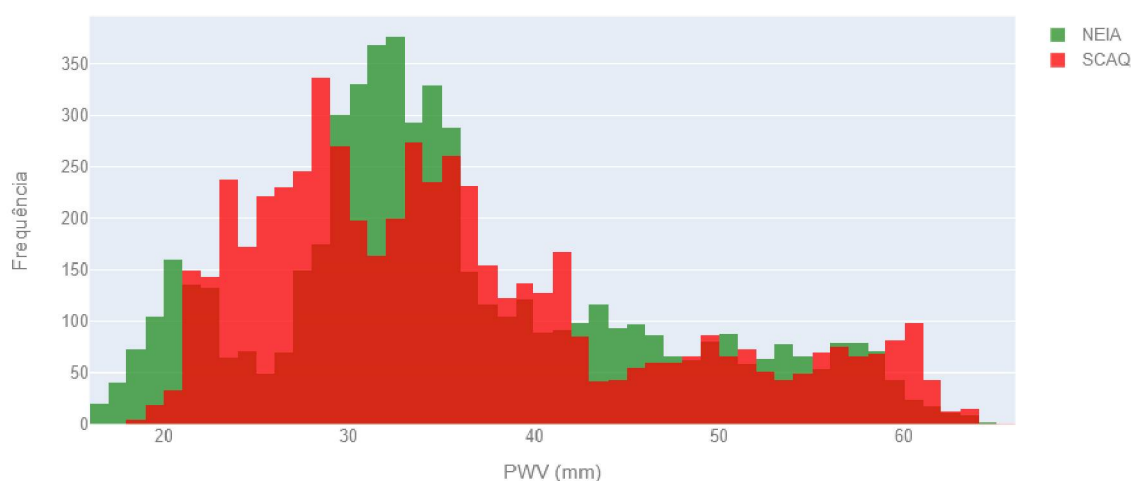
Os gráficos dos violinos obtidos para as estações UFPR e PIR, como era esperado, possuem deslocamentos verticais em relação aos outros, devido a menor quantidade de PWV nestas estações. Inclusive, seus respectivos conjuntos apresentaram distribuição similar entre si, concentrando a maior quantidade de dados entre 10 mm e 30 mm, com mínimos beirando 8 mm e máximos beirando 50 mm (Tabela 12). Na faixa dos 20 mm é possível ver como a distribuição se torna mais destacada, indicando uma maior concentração de dados nesta região do conjunto, por mais que sua mediana e sua média estejam ligeiramente acima.

As estações ANT e CEM também possuem distribuições similares entre si, com a maioria de seus dados estando entre 20 mm e 40 mm, mais distribuídos do que os anteriores. Seus mínimos são próximos a 15 mm enquanto seus máximos são

próximos a 65 mm. Pode-se verificar que tais gráficos possuem dados mais concentrados do que UFPR e PIR. Isto pode indicar que sobre estas estações o vapor d'água é mais instável, uma vez que, em momentos excedentes a ocorrência dos picos (onde os valores cruzam a barreira dos 40 mm), o vapor d'água não se concentra próximo a apenas uma faixa, resultando em uma concentração mais distribuída. O motivo desse padrão para as estações de maiores altitudes pode ser atribuído às cadeias montanhosas entre o litoral e as estações. Elas atuam como barreiras para o fluxo de vapor, desta forma, o PWV advindo das frentes oceânicas impacta menos essa região por não estar ao Nível Médio do Mar (NMM).

Os gráficos de violinos para as estações NEIA e SCAQ foram os mais peculiares do grupo. Ambos apresentam um padrão de distribuição único e diferente dos demais. Enquanto o gráfico de violino da estação SCAQ apresentou aglomeração de dados mais distribuída entre 20 mm e 40 mm, o gráfico da estação NEIA mostra maior concentração na faixa dos 32 mm, e uma pequena aglomeração em 20 mm. Tendo como base esses resultados, os gráficos de violino indicam uma maior variabilidade do vapor - nas estações SCAQ, CEM e ANT, e menor nas estações UFPR, PIR e NEIA. O conteúdo apresentado na Figura 31 corrobora essa análise, pois mostra o histograma dos conjuntos de dados das estações NEIA e SCAQ. Pode-se perceber como até o valor de 40 mm, a estação SCAQ apresentou aglomeração mais concentrada, com frequências mais baixas, porém mais bem distribuídas. A estação NEIA, por sua vez, apresentou dois picos de frequências significativos, entre 17 mm e 23 mm, e entre 30 mm e 35 mm, indicando que, para o período analisado, é mais comum encontrar valores entre estas faixas, do que distribuídos em outros intervalos.

FIGURA 31 – HISTOGRAMAS DE VALORES PWV-GNSS PARA NEIA E SCAQ



FONTE: O Autor (2020)

Mais investigações devem ser realizadas para identificar a causa dos efeitos percebidos na estação NEIA, e verificar se ele é um padrão contínuo ou sazonal. Deve-se destacar que como as massas de ar se movimentam de sul para norte predominantemente, conforme observado nas cartas sinópticas do INPE, pode-se suspeitar que as cadeias montanhosas na região de Guaraqueçaba também dificultam o fluxo de umidade nesta estação, o que pode vir a ser um motivo da distribuição distinta das demais.

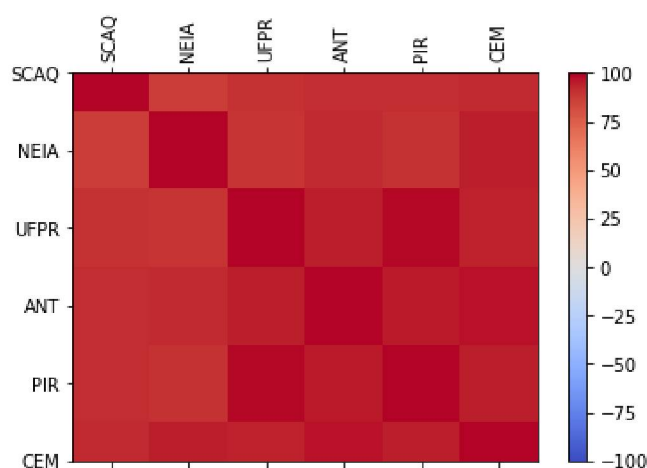
Apesar das sutis diferenças na distribuição dos dados as estações possuem alta correlação entre si, como pode ser verificado na Tabela 13. Os menores valores de coeficiente de correlação de Pearson encontrados foram entre as estações SCAQ e NEIA e NEIA e UFPR, com respectivamente 87,25% e 89,44%. Os demais valores estiveram acima de 90%, sendo as combinações com maior correlação UFPR e PIR, ANT e PIR e ANT e CEM, com 98,51%, 96,03% e 97,07%, respectivamente. Tais resultados foram bastante satisfatórios, e indica que as diferenças sistemáticas nas estações de maiores altitudes não prejudicam a correlação dos dados, e que as variações de dados é praticamente a mesma para todos os conjuntos. Na Figura 32 o gráfico pairwise das correlações auxilia essa conclusão, ressaltando que não há valores abaixo de 87%.

TABELA 13 – PERCENTUAL DE CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES PWV-GNSS

	SCAQ	NEIA	UFPR	ANT	PIR	CEM
SCAQ	100,00%	87,25%	90,60%	91,78%	91,47%	92,86%
NEIA		100,00%	89,44%	92,66%	90,51%	94,87%
UFPR			100,00%	94,75%	98,51%	93,80%
ANT				100,00%	96,03%	97,07%
PIR					100,00%	94,85%
CEM						100,00%

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 32 – GRÁFICO PAIRWISE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES



FONTE: O Autor (2020)

Referente aos resultados das análises por componentes principais foi verificado que a CP1 possui a maior porcentagem de variância do conjunto de estações, com 94,18%, conforme Tabela 14. Na sequência se observa as CP2 e CP3 com 2,40% e 1,94% de variância explicada, respectivamente. As demais componentes estão abaixo de 1%.

TABELA 14 – PERCENTUAL DE VARIÂNCIAS EXPLICADAS POR CADA CP

Componente	Percentual de variância explicada
CP1	94,18%
CP2	2,40%
CP3	1,94%
CP4	0,86%
CP5	0,43%
CP6	0,20%

FONTE: O Autor (2020)

Os valores indicados na tabela 13 significam, então, que as variações entre os conjuntos foram reduzidas praticamente a uma única variável: CP1. A Figura 33 permite uma visualização destas séries contendo os valores das componentes mais relevantes. Percebe-se como a variação da CP1 é a que melhor representa as variações de PWV ilustrados na Figura 28. Variações mais sutis estão representadas pelas componentes CP2 e CP3, e indicam variações com menor correlação entre as estações.

FIGURA 33 – SÉRIES TEMPORAIS DAS COMPONENTES CP1, CP2 E CP3



FONTE: O Autor (2020)

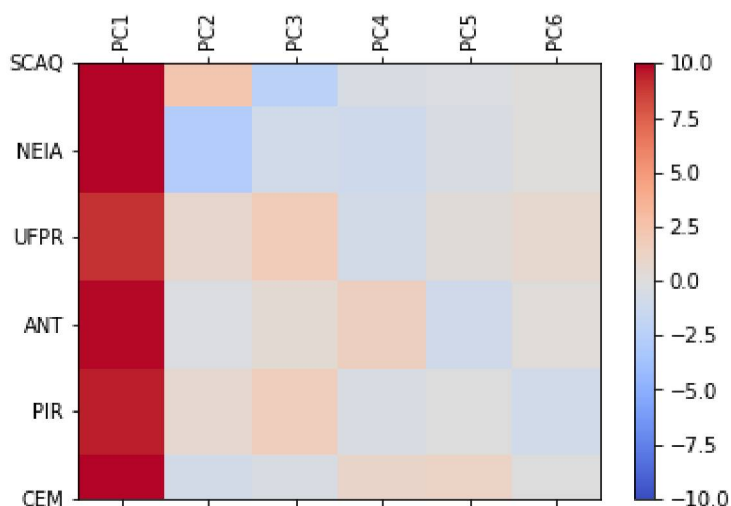
Os carregamentos de cada estação GNSS podem ser visualizados na Tabela 15 e Figura 34. Todas as estações tiveram seus principais carregamentos ressaltados na CP1, o que indica que, em termos de padrões das séries temporais, todas pertencem a uma mesma região homogênea. Os segundos maiores valores (em módulo) estiveram na CP2 para SCAQ e NEIA, CP3 para UFPR e PIR e CP4 para ANT e CEM. O fato de UFPR e PIR, bem como, ANT e CEM apresentarem carregamentos de segunda ordem nas mesmas componentes principais pode indicar que os demais carregamentos auxiliam em uma possível segmentação da região. Entretanto, análises mais aprofundadas devem ser realizadas para comprovar este fato. SCAQ e NEIA, por mais que tenham seus carregamentos secundários na mesma componente, apresentam sinais opostos, o que supostamente pode indicar que se localizam em diferentes regiões.

TABELA 15 – VALORES DE CARREGAMENTOS DAS ESTAÇÕES GNSS

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
SCAQ	10,24	2,33	-2,23	-0,42	-0,17	0,01
NEIA	9,95	-2,81	-0,87	-1,03	-0,32	0,01
UFPR	9,03	0,78	1,80	-0,77	0,24	0,72
ANT	9,89	-0,19	0,48	1,51	-0,98	0,16
PIR	9,47	0,68	1,62	-0,44	-0,04	-0,83
CEM	10,58	-0,70	-0,46	1,02	1,22	-0,04

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 34 – GRÁFICO PAIRWISE DE CARREGAMENTOS DAS ESTAÇÕES GNSS



FONTE: O Autor (2020)

Mediante as análises efetuadas até o momento pode-se dizer que as estações GNSS sofrem os mesmos efeitos troposféricos, com variações semelhantes e alta correlação. Entretanto, a homogeneidade em termos de vapor d'água foi testada definitivamente através do teste de homogeneidade regional, cujos resultados são apresentados na Tabela 16. Observa-se que quatro testes foram realizados: considerando todas as estações (1); considerando apenas as estações localizadas no litoral (2); considerando apenas as estações de maiores altitudes (3); considerando todas as estações, mas somando-se o valor de 11,48 mm a todos os dados de UFPR e PIR (4) e; considerando apenas as estações localizadas no litoral (2); considerando apenas as estações SCAQ e NEIA (5). Estas cinco realizações foram importantes para averiguar a diferença sistemática existente em UFPR e PIR, e foram executadas

de modo a verificar se tal diferença impacta nos resultados de teste de homogeneidade.

TABELA 16 – RESULTADOS DOS TESTES DE HOMOGENEIDADE REGIONAL

Teste de Homogeneidade Regional (1)	
Número de Simulações	500
Medida de Heterogeneidade	11,76
Teste de Homogeneidade Regional (2)	
Número de Simulações	500
Medida de Heterogeneidade	0,86
Teste de Homogeneidade Regional (3)	
Número de Simulações	500
Medida de Heterogeneidade	0,47
Teste de Homogeneidade Regional (4)	
Número de Simulações	500
Medida de Heterogeneidade	0,87
Teste de Homogeneidade Regional (5)	
Número de Simulações	500
Medida de Heterogeneidade	0,88

FONTE: O Autor (2020)

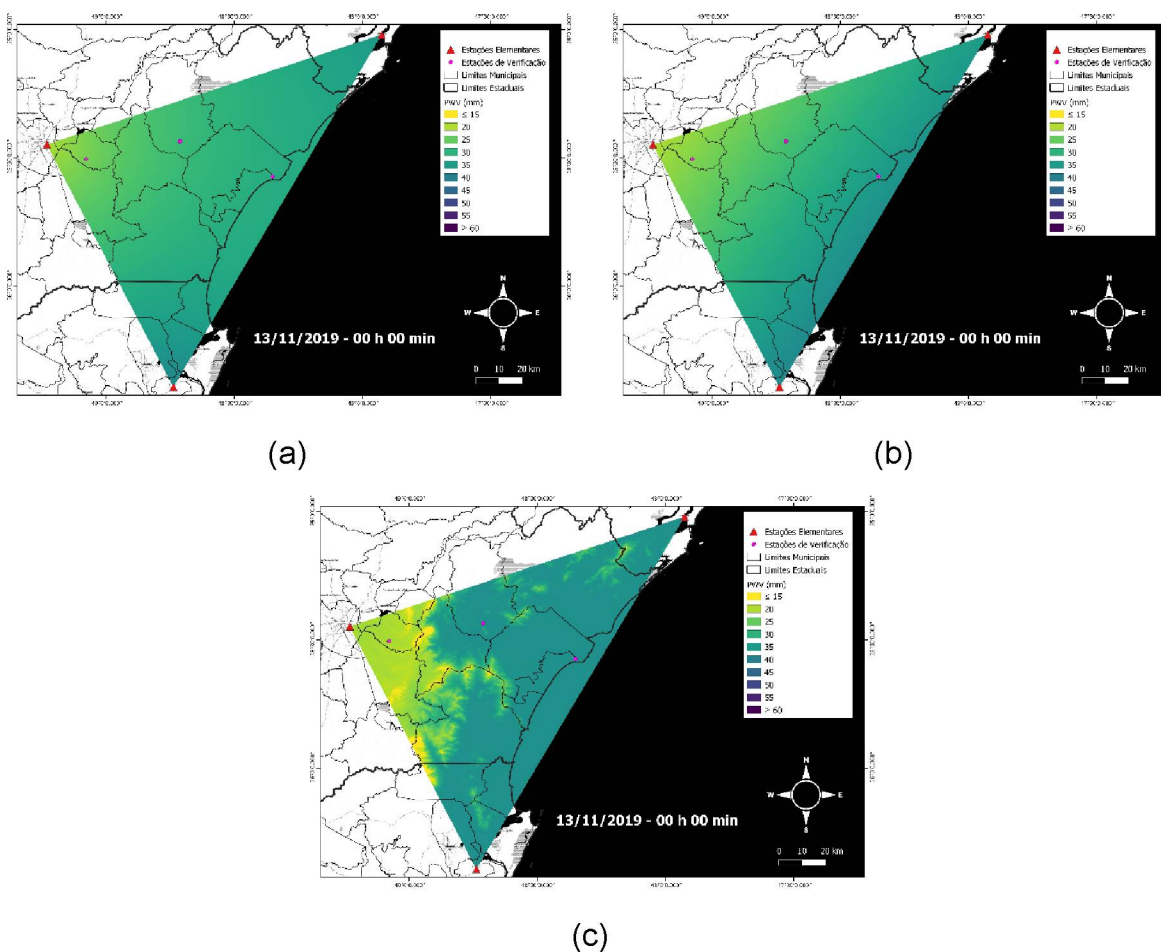
Por meio da Tabela 16 notam-se as cinco diferentes medidas de heterogeneidade. Seus valores foram de 11,76, 0,86, 0,47, 0,87 e 0,88, aos testes (1), (2), (3), (4) e (5), respectivamente. Sendo os conjuntos de dados homogêneos quando tal medida é inferior a 1, e heterogêneos quando for maior que 2, tem-se que o primeiro teste não teve sua hipótese aceita. Isso significa que a região não pode ser considerada homogênea em termos de vapor d'água quando analisadas todas as estações. Ao estudar apenas as estações litorâneas e apenas as estações de maiores altitudes, separadamente, percebe-se que ambos os testes permitem a aceitação da hipótese, considerando as sub-regiões homogêneas. Esse fato indica que a diferença sistemática das estações de maiores altitudes interfere de forma significativa na homogeneidade local. O quarto teste, em caráter de simulação, também teve hipótese aceita, e provou que se não fosse tal diferença devido à altitude, todas as estações seriam consideradas homogêneas. Este fato deve ser objeto de atenção na etapa de interpolação espacial, pois pode afetar consideravelmente os resultados. O último teste, feito com a intenção de verificar possível heterogeneidade nos dados de SCAQ e NEIA (que apresentaram padrões diferentes dos demais conjuntos), acusou forte homogeneidade regional.

4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Os algoritmos de interpolação espacial têm como entrada as séries temporais das estações elementares e como saída arquivos raster georreferenciados no sistema de referência SIRGAS2000. Para cada época de dado de vapor d'água foram gerados três rasters respectivos aos três métodos de interpolação: inverso da distância (IDW), krigagem universal (UK) e krigagem universal ponderada pela altitude (UK-EW), conforme seção 3.4. Exemplos de resultados para dois instantes são apresentados nas Figuras 35 e 36. Ressalta-se que as estações de verificação não foram utilizadas para interpolar os dados, sendo que seus dados, nesta etapa, foram utilizados para validar os resultados obtidos.

FIGURA 35 – RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL EM MOMENTO DE BAIXO PWV

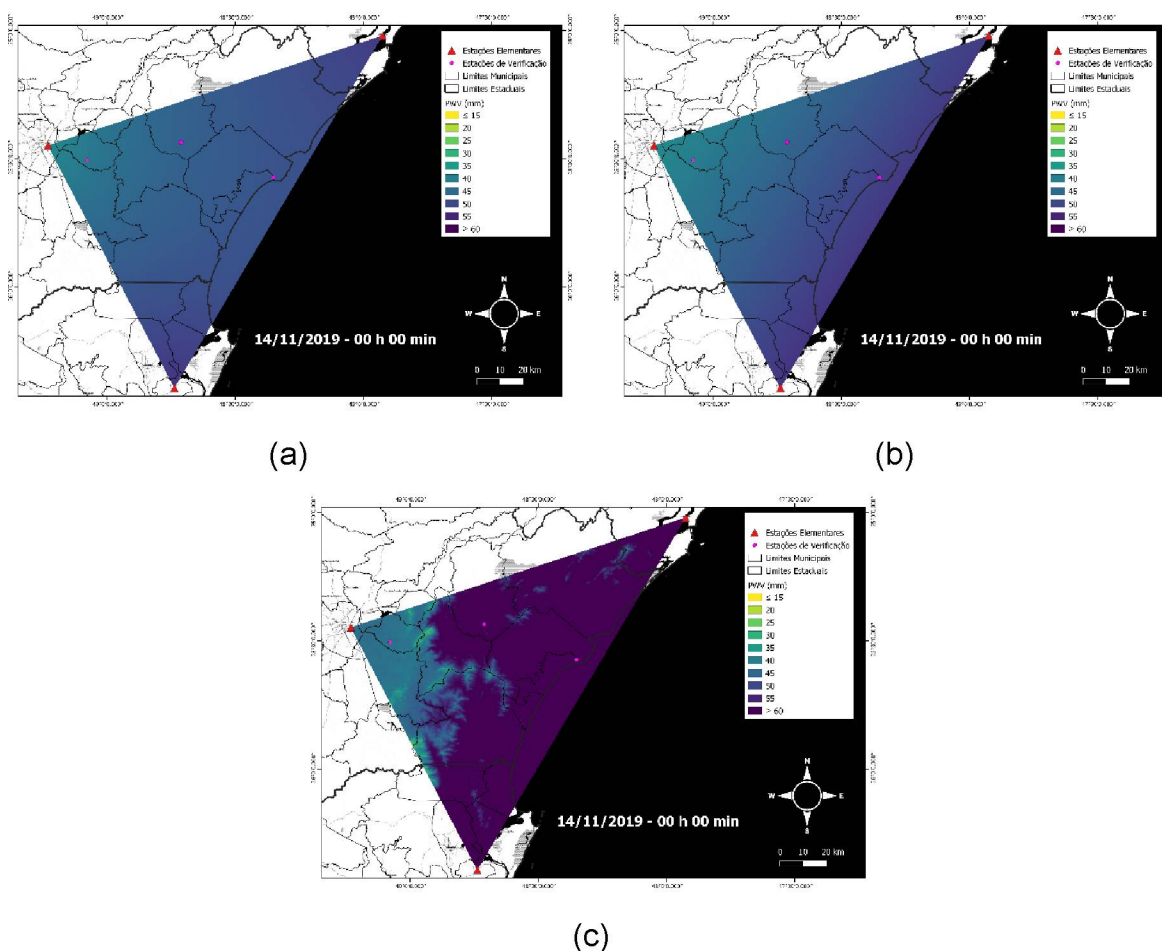
(a) IDW; (b) UK; (c) UK-EW



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 36 – RESULTADOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL EM MOMENTO DE ALTO PWV

(a) IDW; (b) UK; (c) UK-EW



FONTE: O Autor (2020)

Conforme explicado na seção 2.5, as interpolações IDW e UK foram realizadas de modo a verificar os resultados empregando-se dois princípios distintos na interpolação do vapor d'água: simples e geoestatístico. O método UK-EW foi desenvolvido após verificar-se que a altitude do ponto deveria ser levada em consideração, uma vez que os dados provenientes de estações de maiores altitudes impactam consideravelmente as estações litorâneas. Um exemplo deste impacto pode ser observado nas figuras apresentadas anteriormente. Verifica-se que a estação ANT, nos métodos IDW e UK, tem seus valores superestimados devido a influência dos dados da estação UFPR, ao passo que o método UK-EW demonstra que seus valores são similares aos dados de SCAQ e NEIA, que possuem altitudes similares.

Deste modo foram calculadas as discrepâncias entre os valores PWV das estações ANT, CEM e PIR (valores de referência) para cada método de interpolação, em todas as épocas da série temporal. As Tabelas 17, 18 e 19 trazem os resultados estatísticos de cada conjunto de discrepância.

TABELA 17 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE IDW

	IDW		
	ANT	CEM	PIR
Número de Amostras	5632	5632	5632
Média (mm)	6,16	2,23	3,02
Desvio Padrão (mm)	2,48	1,25	2,12
Mínimo (mm)	0,00	0,00	0,00
Percentil 25% (mm)	4,52	1,27	1,48
Percentil 50% (mm)	6,04	2,19	2,67
Percentil 75% (mm)	7,58	3,08	4,10
Máximo (mm)	16,50	8,05	20,97
REMQ (mm)	6,64	3,68	2,56

FONTE: O Autor (2020)

O primeiro método empregado foi o IDW. O erro médio foi de 6,16 mm para ANT, 2,23 mm para CEM e 3,02 mm para PIR, com REMQ iguais a 6,64 mm, 3,68 mm e 2,56 mm, respectivamente. Pelo menos 75% dos dados estavam abaixo de 7,59 mm, 3,09 mm e 4,10 mm, respectivamente para ANT, CEM e PIR, sendo que o valor mínimo para todas as estações foi igual a 0,00 mm. Estes valores indicam que a estação com maiores erros foi à estação ANT, por estar horizontalmente mais próxima da estação UFPR, enquanto seus valores são similares as estações litorâneas. A estação CEM é classificada como a segunda pior, pois mesmo que sua média seja melhor que a estação PIR, seu REMQ indica o contrário. A estação PIR foi a mais bem avaliada por meio deste método.

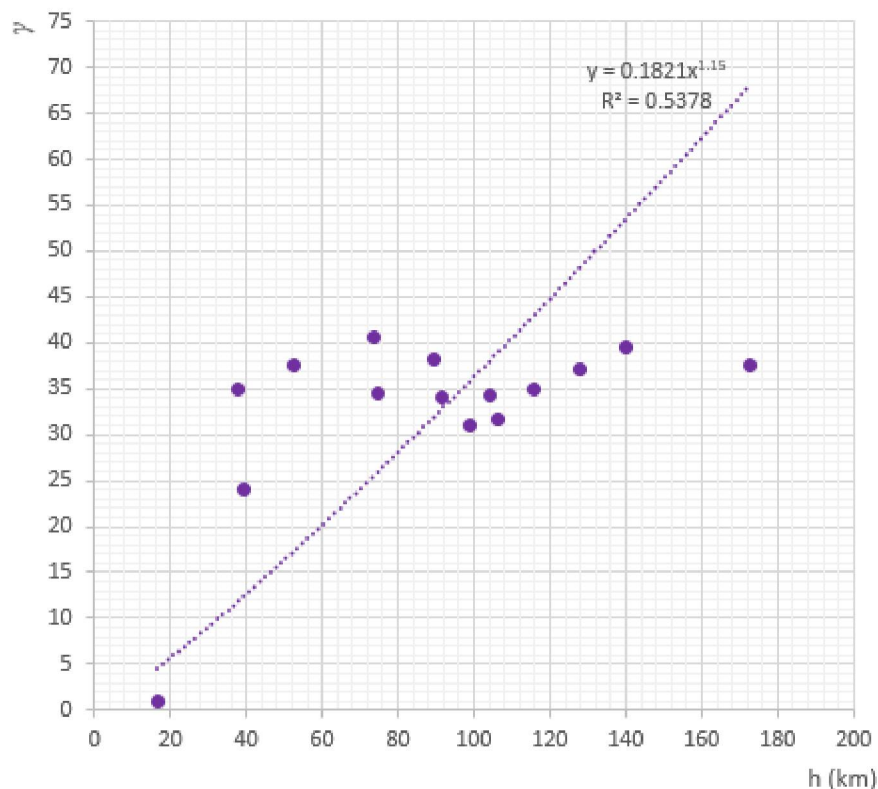
TABELA 18 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE UK

	UK		
	ANT	CEM	PIR
Número de Amostras	5632	5632	5632
Média	6,68	1,71	1,83
Desvio Padrão	2,49	1,12	1,65
Mínimo	0,01	0,00	0,00
Percentil (25%)	5,11	0,82	0,63
Percentil (50%)	6,53	1,58	1,42
Percentil (75%)	8,03	2,44	2,55
Máximo	17,72	7,33	17,99
REMQ	7,12	2,47	2,05

FONTE: O Autor (2020)

O método UK gerou resultados melhores para as estações CEM e PIR, mas piores para a estação ANT. Enquanto as médias das duas primeiras ficaram, respectivamente, em 1,71 mm e 1,83 mm, a média da terceira aumentou para 6,68 mm. O REMQ desta estação também aumentou para 7,12 mm, enquanto para CEM e PIR, diminuíram para 2,47 mm e 2,05 mm. Como o método da krigagem explora as propriedades geoestatísticas entre as estações, é normal que as estações elementares mais próximas tenham mais influência nos resultados do local estimado. Deste modo, piores resultados na estação ANT eram esperados, pelo mesmo motivo citado no parágrafo anterior. De fato, a solução UK deveria apresentar dados melhores que os obtidos pelo IDW, o que não foi possível devido à dependência altimétrica dos dados. Na Figura 37 verifica-se o semivariograma experimental calculado a partir dos dados de PWV entre as estações da região, sem levar em consideração a diferença devido à altitude. Percebe-se como os dados não representam uma ordem natural de dependência espacial conforme apresentado na seção 2.4, originando um “efeito pepita” onde não há covariância espacial entre as estações. O valor R^2 é o coeficiente de determinação do modelo de potência ajustado aos dados (semivariograma teórico), neste caso igual a 53,78%. Entre os modelos linear, exponencial, gaussiano e de potência disponíveis, este foi o que apresentou melhor ajuste. Ressalta-se que este gráfico é apenas em caráter de investigação, não foi utilizado para treinar os interpoladores, o que ocasionaria em tendência nas análises realizadas e superestimativa dos resultados.

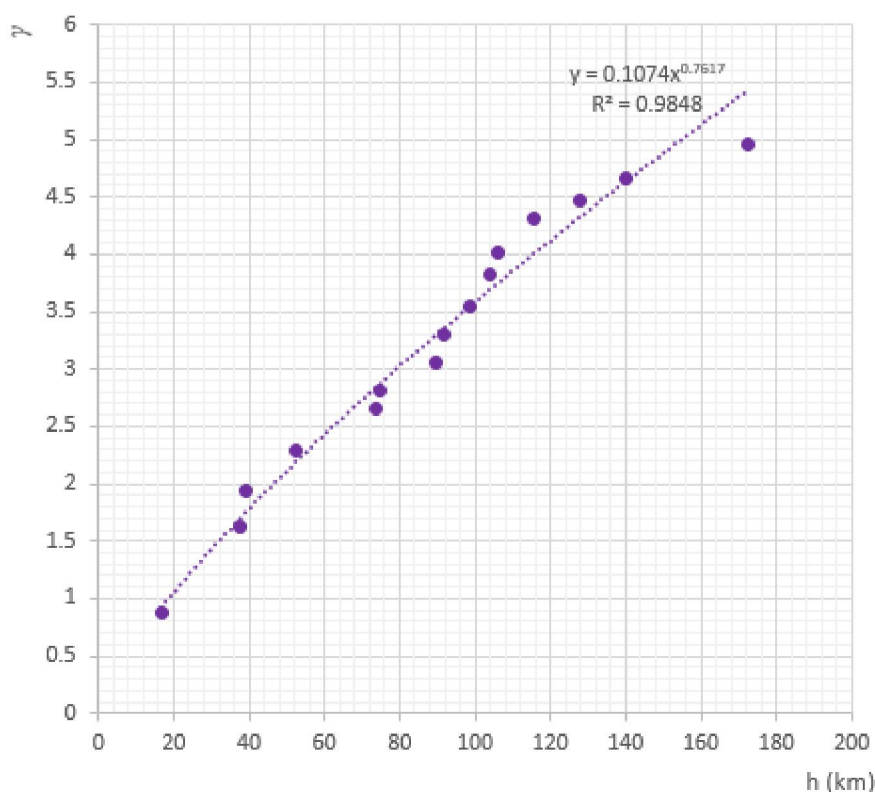
FIGURA 37 – SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL DOS VALORES PWV-GNSS



FONTE: O Autor (2020)

O método UK-EW seria o aprimoramento do estimador UK, considerando a dependência espacial altimétrica entre os pontos interpolados e as estações elementares. Havendo detectado efeito pepita nos resultados da krigagem universal, o modelo foi corrigido e ajustado, agora considerando as diferenças de valores devido à altitude. O semivariograma corrigido (Figura 38) melhorou 83,12% em comparação ao anterior, dado seu valor R^2 ainda para o modelo de potência, que apresentou melhor coeficiente. Percebe-se que após este aprimoramento o semivariograma indica forte covariância espacial entre as estações, provando que a diferença de PWV é diretamente proporcional a distância entre as estações. A primeira observação dá a entender que o gráfico ainda possui uma tendência, uma vez que não alcança um patamar (parâmetro de correlação espacial importante na geoestatística). Entretanto, se for bem observado percebe-se que após 120 km de distância os valores tendem a convergir para uma estabilidade, mas a distância máxima entre estações nesse estudo não foi o suficiente para que isso ocorresse. Os resultados das comparações entre os valores estimados com este método e os valores modelados são apresentados na Tabela 19.

FIGURA 38 – SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL DOS VALORES PWV-GNSS APÓS CORREÇÃO DA DIFERENÇA DEVIDO A ALTITUDE



FONTE: O Autor (2020)

TABELA 19 – RESUMO ESTATÍSTICO DA VALIDAÇÃO DE UK-EW

	UK-EW		
	ANT	CEM	PIR
Número de Amostras	5632	5632	5632
Média	2,35	1,11	1,92
Desvio Padrão	1,87	0,93	1,51
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Percentil (25%)	0,90	0,41	0,73
Percentil (50%)	1,93	0,88	1,58
Percentil (75%)	3,33	1,57	2,73
Máximo	10,28	7,68	8,15
REMQ	2,99	2,44	1,44

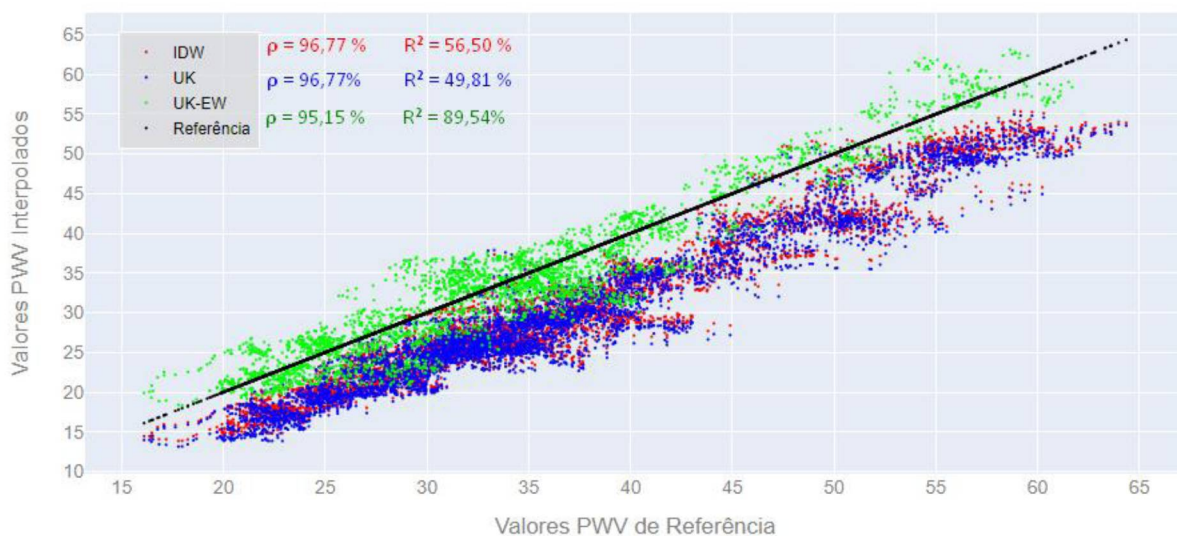
FONTE: O Autor (2020)

Mediante os valores indicados na tabela 18 percebe-se uma melhora todos os pontos verificados, sendo a mais significativa à estação ANT, e a menos significativa a estação CEM. As respectivas médias para ANT, CEM e PIR foram 2,35 mm, 1,11

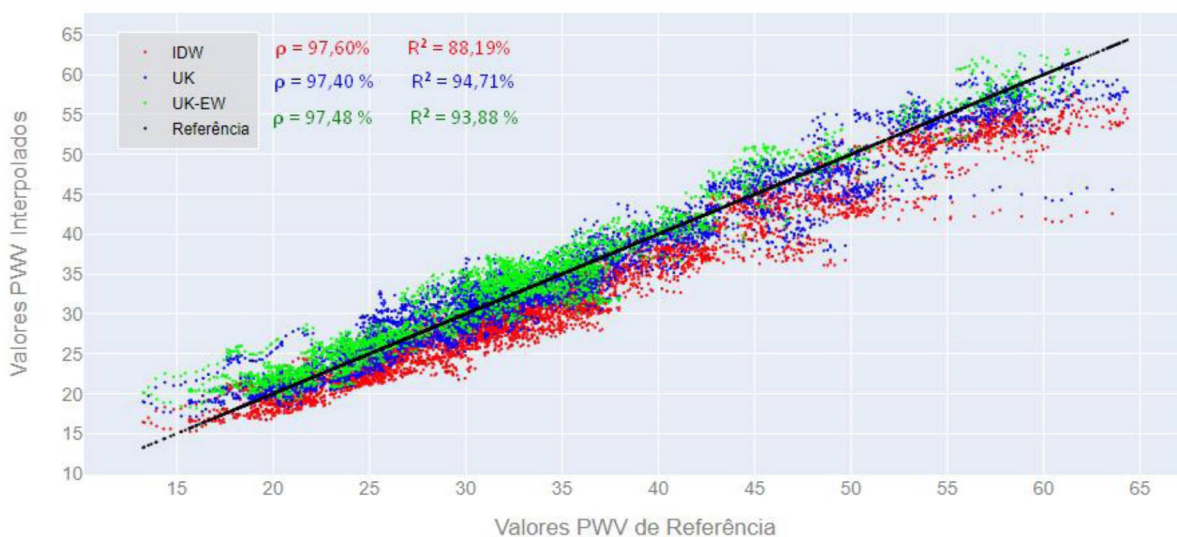
mm e 1,92 mm e os respectivos REMQ tiveram melhoras, em relação ao método UK, em 58,00%, 1,21% e 29,75%, com valores de 2,99 mm, 2,44 mm e 1,44 mm. Todos os valores são inferiores a 3 mm. Sendo o limite recomendado pela bibliografia igual a 2 mm, julga-se a metodologia eficaz, mesmo com a quantidade mínima de estações para se executar uma interpolação espacial. Os percentis 75% também mostram que neste caso a maioria do módulo das discrepâncias estão abaixo de 3,33 mm, 1,57 mm e 2,73 mm. A Figura 39 ilustra a disposição dos dados PWV modelados versus os valores PWV interpolados em ambos os métodos. Podem ser observadas as tendências nos dados que foram posteriormente corrigidas empregando-se UK-EW.

FIGURA 39 – REGRESSÃO LINEAR NA ANÁLISE DOS INTERPOLADORES

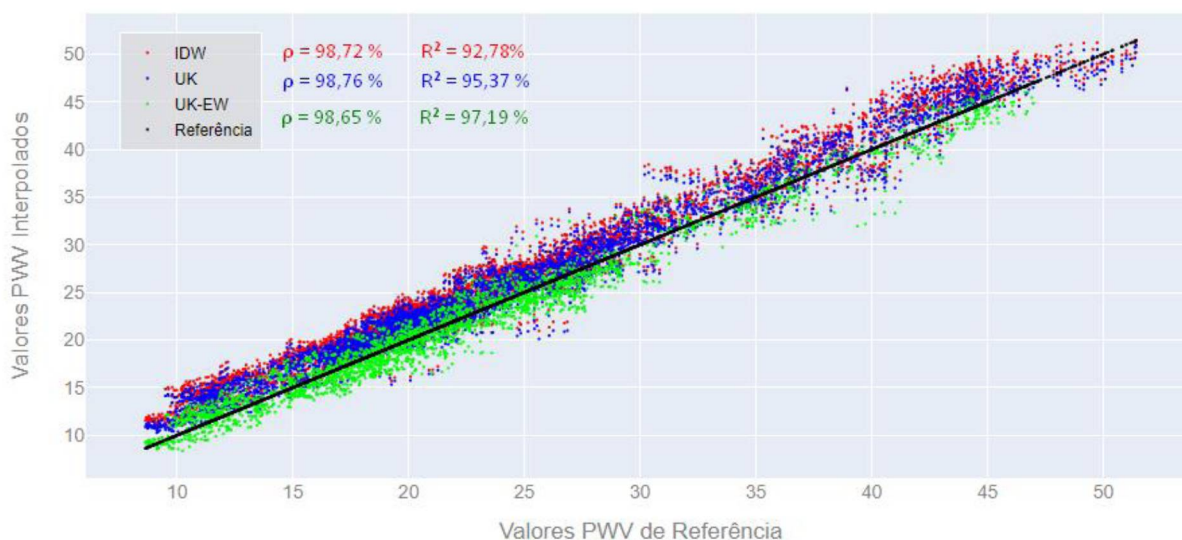
(a) ANT; (b) CEM; (c) PIR



(a)



(b)



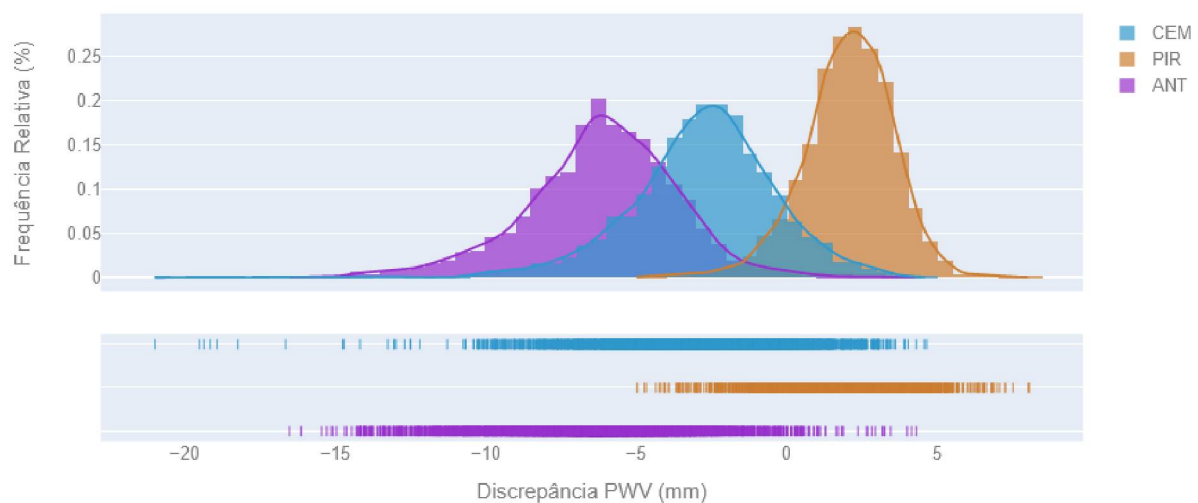
(c)

FONTE: O Autor (2020)

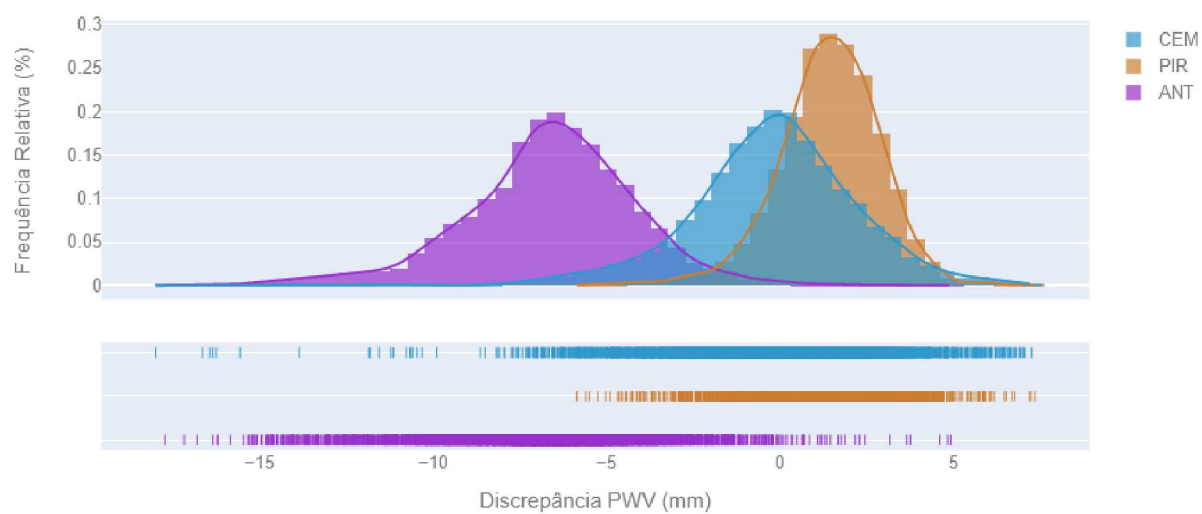
Os coeficientes de determinação entre os dados indicam o quanto cada método se aproximou do modelo linear de referência. A estação PIR foi a que apresentou melhores resultados em ambos os métodos, com R^2 variando de 92,78% no IDW para 97,19% no UK-EW. CEM teve seu coeficiente aprimorado de 88,19% (IDW) para 93,88% (UK-EW). Como se esperava, a maior diferença foi observada na estação ANT, onde o coeficiente de correlação esteve em 56,50% no IDW, piorou para 49,81% no UK e aumentou para 89,54% após a aplicação do UK-EW, ou seja, um aprimoramento de 79,76%. De forma a elucidar os desvios e as tendências encontradas nos métodos de interpolação, na Figura 40 são apresentados os gráficos de distribuição dos conjuntos das discrepâncias.

FIGURA 40 – GRÁFICOS DE DISTORÇÃO DOS CONJUNTOS INTERPOLADOS

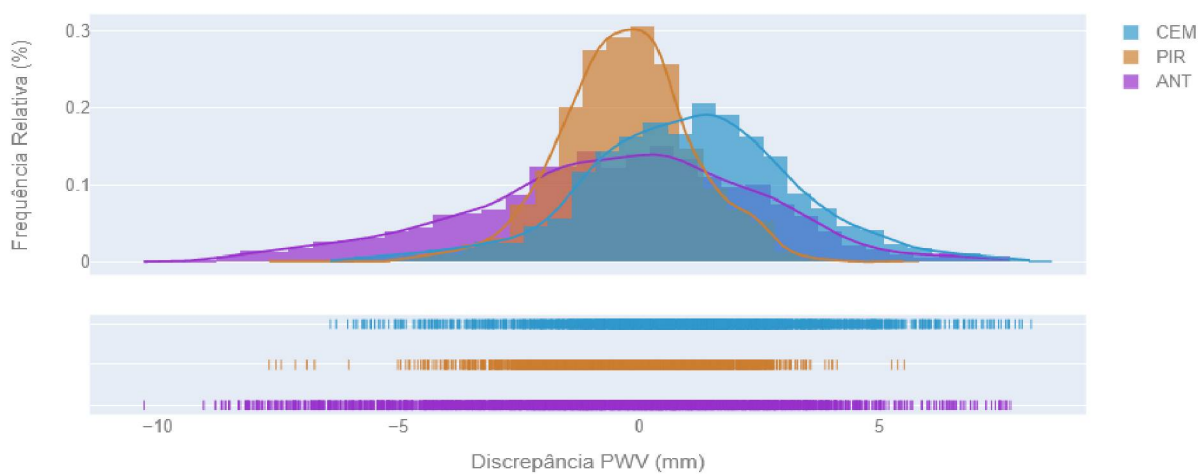
(a) IDW; (b) UK; (c) UK-EW



(a)



(b)



(c)

FONTE: O Autor (2020)

Os dados das Tabelas 17 a 19, bem como, da Tabela 20 ficam evidenciados pelo gráfico apresentado na Figura 40. O método IDW teve os piores resultados, apresentando fortes tendências ao negativo para ANT e CEM e ao positivo para PIR. As tendências em CEM foram consideravelmente reduzidas no método UK, enquanto PIR e ANT não apresentaram melhoras significativas (para ANT só foram observadas piores). O último método, UK-EW, resultou nas melhores distribuições com médias mais próximas de 0,00 mm, intervalos mais reduzidos e tendências significativamente minimizadas, com exceção de CEM que teve sua média mais tendenciada ao positivo. Todos os conjuntos de discrepâncias, em ambos os métodos, apresentaram distribuição gaussiana. Seguem, na Tabela 20, os valores de *p* resultados do teste de Mann-Whitney para os três interpoladores.

TABELA 20 – RESULTADOS DO TESTE MANN-WITHNEY PARA A ETAPA DE INTERPOLAÇÃO

Interpolador	Parâmetro	ANT	CEM	PIR
IDW	Estatística <i>U</i>	9972073,0	13264018,0	13582484,0
	p-valor	1,89e-255	1,93e-51	4,57e-40
UK	Estatística <i>U</i>	9559791,0	15806162,0	14279434,0
	p-valor	4,02e-292	0,38	2,64e-20
UK-EW	Estatística <i>U</i>	4495116,0	4384426,0	4632386,0
	p-valor	0,04	5,02e-07	0,09

FONTE: O Autor (2020)

As tendências observadas nas análises anteriores também ficam em evidência ao analisar os p-valores apresentados. O teste *U* indicou que todos os métodos, em todas as estações com exceção de ANT e PIR no método UK-EW e CEM no método UK, tiveram tendências relevantes. Nenhuma estação teve hipótese nula aceita (em nenhum nível de significância) no método IDW e apenas CEM foi aceita no método UK. O método UK-EW conduziu a não aceitação da hipótese nula para CEM, enquanto foi aceita para PIR a nível de 5% e para ANT a nível de 4%. Analisando os valores entre os métodos de interpolação comprova-se que a diferença de altitude incide em forte erro sistemático para a interpolação de vapor d'água, e que o próprio método de krigagem ponderada pela altitude corrigiu de maneira significativa as tendências e desvios existentes devido a essa diferença. O motivo por CEM ter discrepâncias significativamente relevantes no último método não ficou claro, mas

revés como estes eram esperados devido a pouca quantidade de estações no procedimento de interpolação geoestatística.

Desta forma, a ressalva da adversidade na estação CEM indica que o estudo não exauriu o assunto e mais investigações são bem-vindas para contribuir com o tema. Entretanto, considerando as melhoras de resultados observadas ao empregar o interpolador UK-EW, já prova a potencialidade do método quando considerada a topografia regional. Ressalta-se ainda que toda essa metodologia foi implementada considerando apenas 3 estações de apoio para a interpolação espacial, ou seja, a quantidade mínima de estações possível. Aumentando-se o número de amostras, a acurácia dos resultados tende a melhorar. Realizando-se um rápido experimento, onde foram empregadas as estações CEM e PIR também como pontos de apoio, durante 1 dia de observação (276 amostras), a média e REMQ das discrepâncias da estação ANT melhoraram de 2,40 mm e 3,11 mm, respectivamente, para 1,91 mm e 2,60 mm.

4.5 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES PARA PASSAGEM DE FRENTE

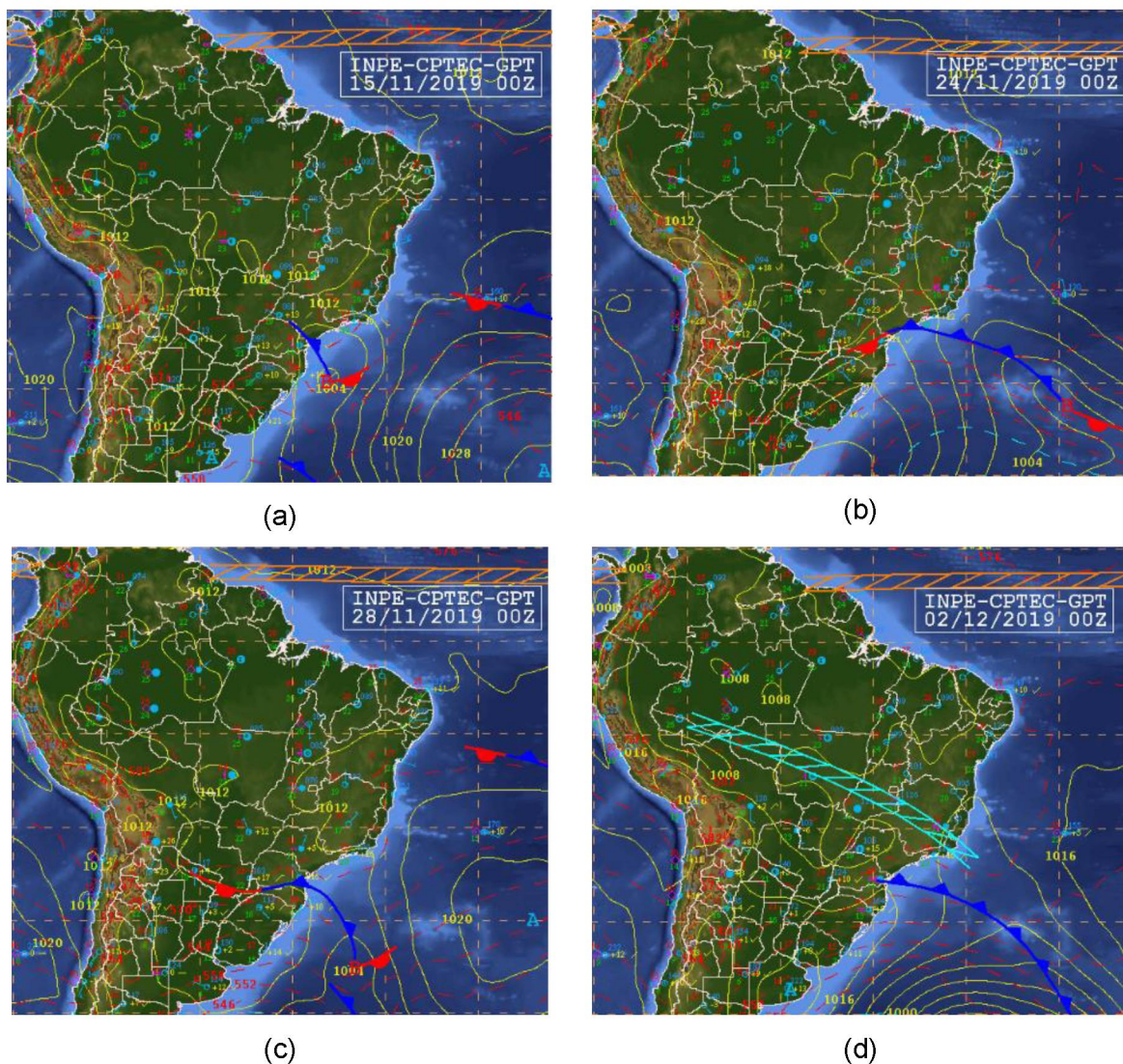
De posse dos arquivos raster UK-EW, foram extraídas as séries temporais PWV para um determinado ponto ao centro da região de estudo, de modo a compará-las com os arquivos de cartas sinóticas produzidas pelo INPE. O ponto usado para esta análise foi o local da estação meteorológica de Antonina/SIMEPAR, cujas coordenadas geodésicas são 25,45° S e 48,69° O. Esse local foi escolhido com o objetivo de comparar os valores de PWV com os registros de precipitação oriundos desta estação. Estes registros foram introduzidos a caráter de verificação de possíveis padrões de chuva nas séries PWV, mas não são base para definição de fronteiras de massas de ar.

Ao analisar as épocas de passagem de massas de ar pré-frontais por meio das cartas sinóticas, foi possível verificar um padrão de comportamento nas séries temporais durante a ocorrência do evento atmosférico. Durante toda a campanha de campo foram verificados 4 eventos frontais sobre a região, evidenciados na Figura 41. De modo geral, analisando-se série temporal interpolada, concluiu-se que sempre que uma frente passa pelo local o seguinte comportamento ocorre (Figura 42):

- o índice de vapor d'água inicia seu aumento aproximadamente 48h antes da passagem da frente;
- aproximadamente 12 h antes do momento da passagem começa a haver os efeitos da frente, com instabilidades na concentração de vapor, ou seja, aumentos e quedas sucessivas que causam consideráveis picos nas cristas da série;
- ligeiramente após a passagem da frente há uma queda brusca nos índices de vapor, gerados pelo aumento da pressão atmosférica.

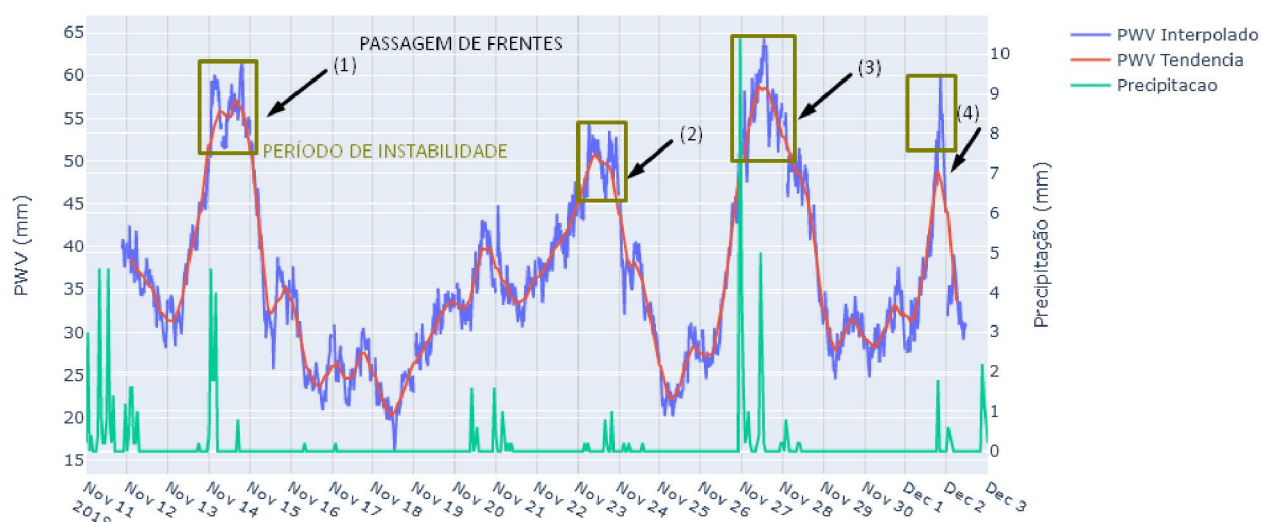
FIGURA 41 – CARTAS SINÓTICAS DOS MOMENTOS DE PASSAGEM DE FRENTE

a) 00h do dia 15 de novembro de 2019, b) 00h do dia 24 de novembro de 2019, c) 00 h do dia 28 de novembro de 2019; e d) 00h do dia 02 de dezembro de 2019.



FONTE: Adaptado de INPE (2020)

FIGURA 42 – DESTAQUES PARA PASSAGEM DE FRENTES NAS SÉRIES TEMPORAIS



FONTE: O Autor (2020)

Conforme se verifica na Figura 42 as passagens respeitam a descrição de comportamento mencionado, com exceção da última passagem as 00h do dia 02 de dezembro de 2019. Neste caso, a concentração de vapor d'água começou a aumentar apenas 24 h antes da passagem da frente, não havendo também registro de fortes instabilidades como nos casos anteriores. Entretanto, ainda assim seu pico é similar as ocorrências antecessoras, o que o torna característico de uma passagem de frente. A linha de tendência da série temporal é o que torna claro a ocorrência do evento, ilustrando a inflexão do valor de PWV no momento do evento. As fortes instabilidades nas cristas da série poderiam também ser usadas para prever a antecedência da passagem de frentes, mas podem ser facilmente confundidas, uma vez que toda a série apresenta variações similares.

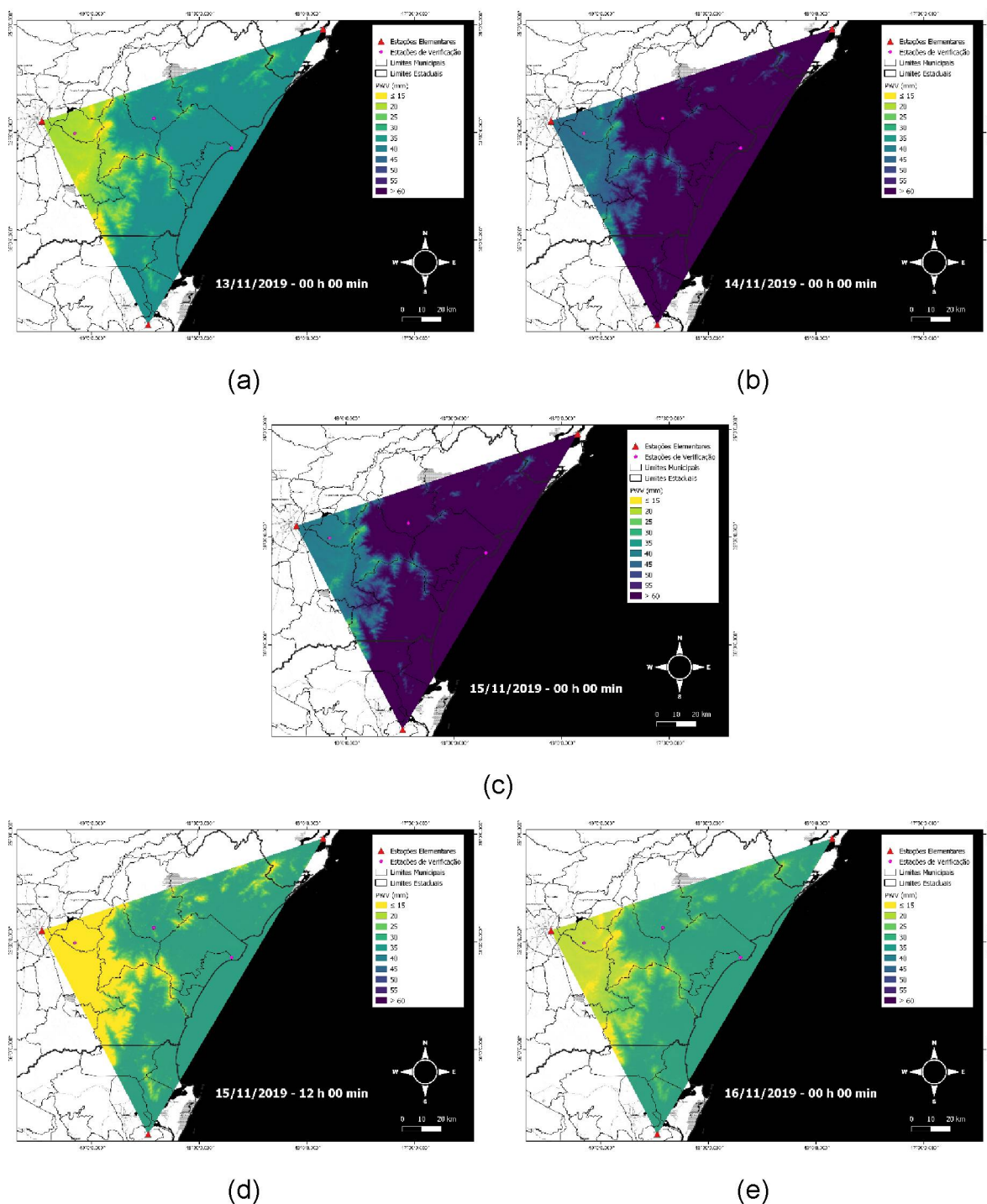
O gráfico da Figura 42 também sugere uma aparente relação entre a variação dos índices de vapor d'água e a ocorrência de precipitação após a passagem da frente, porém investigações devem ser efetuadas a fim de estudar essa correlação. Vias de regra esta dependência é um dos desafios principais dos estudos PWV-GNSS, devido a complexidade de modelagem do fenômeno de precipitação, que além do vapor d'água, também depende de outras variáveis como vento e topografia local. Além disso, a quantidade de vapor não é exaurida apenas pela precipitação, mas também pela condensação em nuvens e dispersão na atmosfera, o que justamente faz com que esta variável seja de tão difícil monitoramento. Sabe-se que autores como Carvalho Filho (2016) e Campos (2018) exploraram este tema, entretanto no

Brasil esta dependência ainda é pouco explorada. Sapucci *et. al.* (2019) é uma obra que merece destaque nesse aspecto, pois dirigiu estudos que sugerem eficiência para previsões de eventos de precipitação forte a torrencial, analisando derivadas temporais de séries PWV-GNSS em território brasileiro.

A distribuição espaço-temporal do conteúdo PWV-GNSS pode ser analisada por meio dos resultados das interpolações geoestatísticas. As Figuras 43 a 46 apresentam a sequência de rasters para cada passagem de frente detectada, com 48 h antes da passagem, 24 h antes da passagem, durante a passagem, 12 h após a passagem e 24 h após a passagem. No anexo A pode se verificar a sequência de rasters dos mesmos eventos com intervalos de 2 h.

FIGURA 43 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 1º EVENTO FRONTAL

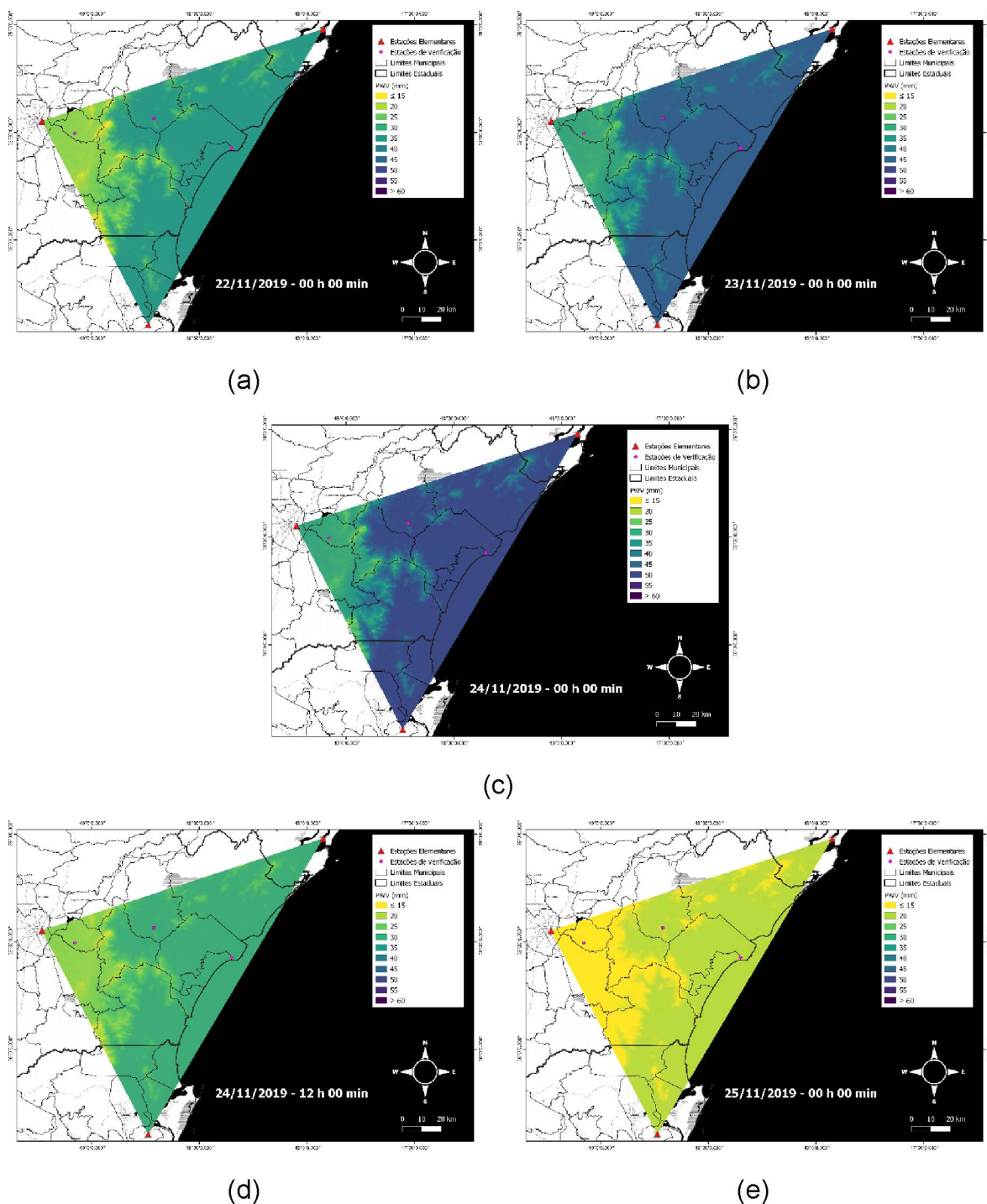
(a) 48 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (b) 24 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (c) DURANTE A PASSAGEM DA FRENTE; (d) 12 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE E (e) 24 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 44 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 2º EVENTO FRONTAL

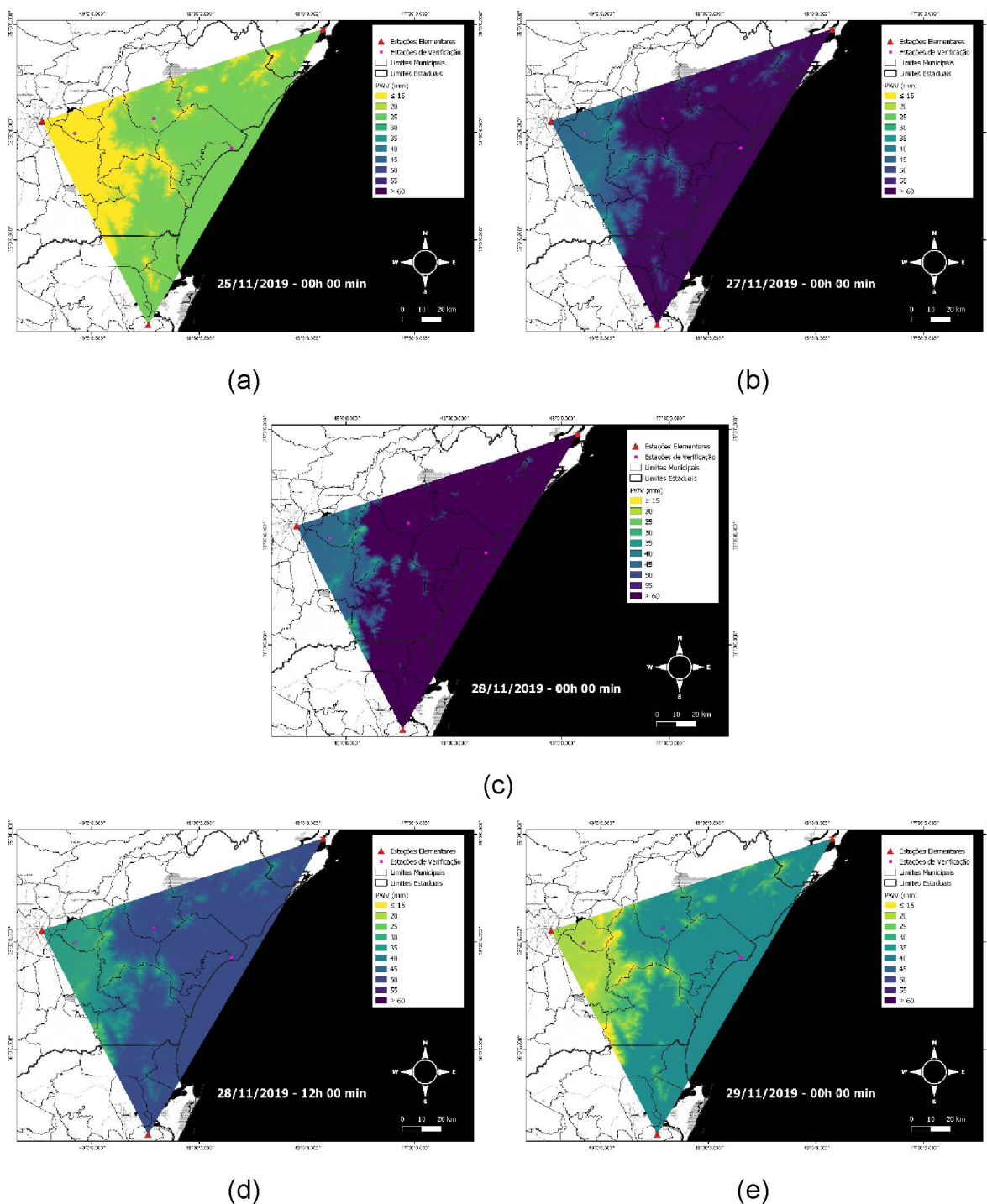
(a) 48 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (b) 24 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (c) DURANTE A PASSAGEM DA FRENTE; (d) 12 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE E (e) 24 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 45 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 3º EVENTO FRONTAL

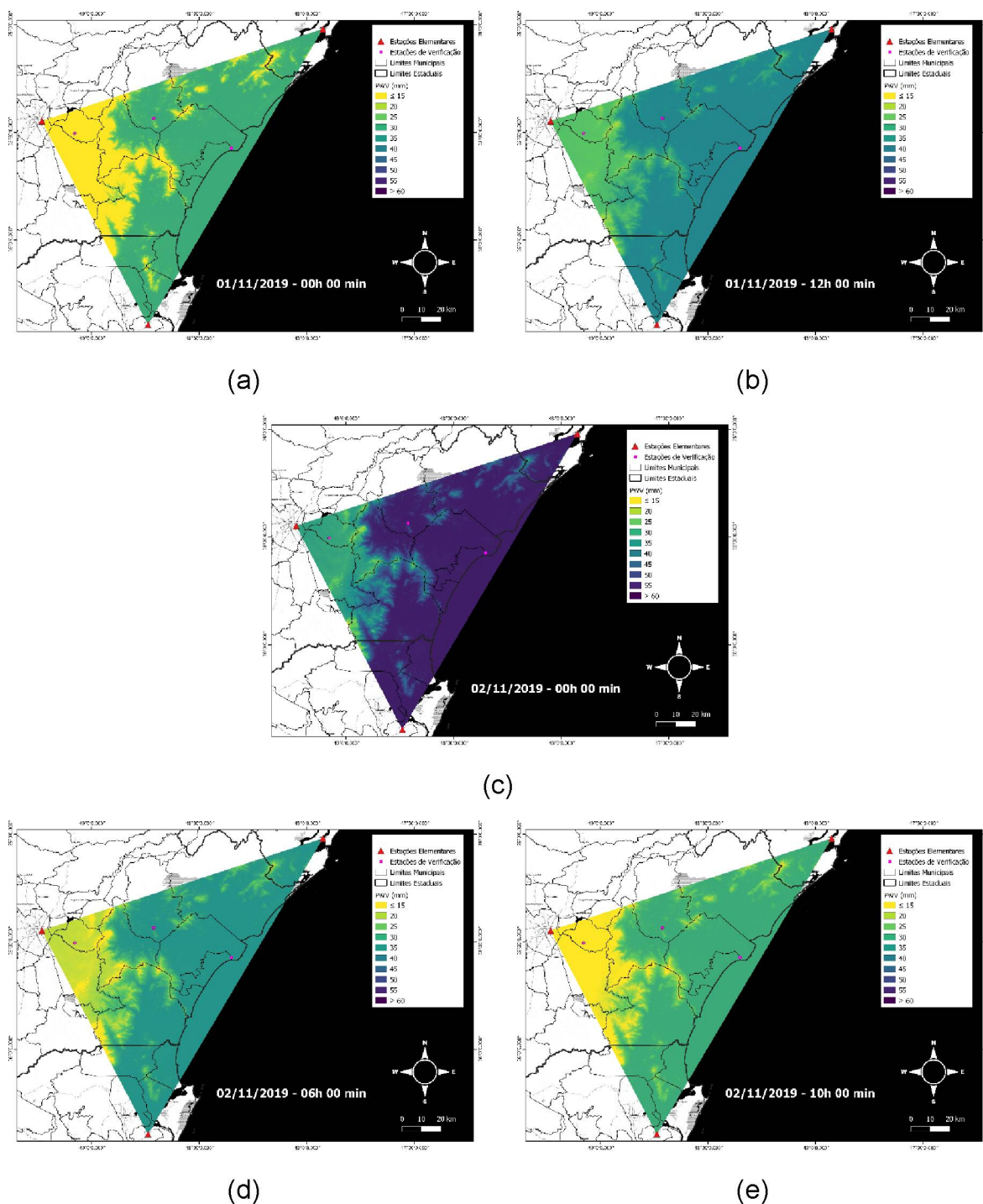
(a) 48 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (b) 24 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (c) DURANTE A PASSAGEM DA FRENTE; (d) 12 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE E (e) 24 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 46 – ESTIMATIVAS PWV DURANTE 4º EVENTO FRONTAL

(a) 24 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (b) 12 HORAS ANTES DA PASSAGEM DA FRENTE; (c) DURANTE A PASSAGEM DA FRENTE; (d) 06 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE E (e) 10 HORAS APÓS A PASSAGEM DA FRENTE



FONTE: O Autor (2020)

5. CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram atingidos com êxito, comprovando-se a correlação e dependência espacial dos valores PWV-GNSS. Tal correlação demonstra que os fenômenos atmosféricos ocorridos na Serra do Mar possuem efeitos similares em todas as estações do estudo. O comportamento das séries temporais permitiu identificar passagem de zonas frontais e aponta ser uma técnica eficaz para estudos climáticos e meteorológicos.

A comparação dos dados de PWV-IBGE com valores PWV-Bernese apresentou coeficientes de determinação entre 95% e 98%, indicando forte similaridade entre os dados. Nesta análise, os dados de SCAQ apresentaram tendência e superestimam os resultados em 2 mm, com relação aos valores considerados de referência. As causas dessa superestimativa não foram identificadas nesse estudo.

Na análise de distância para vínculo a barômetros as estações SCAQ e ANT provaram que a distância não é o fator preponderante para a técnica, mas sim a coerência atmosférica entre as estações, pois empregando dados de barômetros mais distantes obtiveram-se índices mais próximos dos valores de referência. A estação PIR foi a única a apresentar discrepâncias maiores conforme a distância entre as estações aumenta. Entretanto, as discrepâncias médias foram consideradas nulas pelo teste de hipótese em todos os casos, e o menor coeficiente de determinação calculado foi de 99,72%, o que significa que nenhuma das distâncias avaliadas (máximo de 51 km) representou impacto considerável na estimativa de vapor d'água, mesmo com diferenças em altitudes até 891 m. Ressalva-se a importância de efetuar a correção devido à altitude para as medidas de pressão atmosférica.

Ao investigar as séries temporais de vapor d'água das seis estações envolvidas no estudo, verificou-se inicialmente uma diferença sistemática dos valores das estações de maiores altitudes (UFPR e PIR), compreendidas a 880 m de altitude acima das estações litorâneas. Os índices estiveram, em média, 11,48 mm mais baixos. Isto é fruto da diferença altimétrica e consecutivamente da espessura da camada neutrosférica sobre os diferentes pontos rastreados, que implica em menores índices úmidos. A variação temporal, por sua vez, foi similar em todos os pontos, já que seus desvios padrão possuíam um máximo de 1,44 mm de diferença. Este dado

indica que as dinâmicas do vapor d'água, que são originadas pelas dinâmicas de massas de ar, possuem a mesma influência na região, mesmo que os locais de baixa altitude e os de alta altitude venham a apresentar dados sistematicamente distintos.

Ficou evidenciado que a estação SCAQ teve a maior instabilidade, enquanto a estação NEIA foi a mais estável, o que pode estar relacionada à suas respectivas posições em relação à dinâmica de frentes observadas. Pelas cartas sinópticas fornecidas pelo INPE, verificou-se que as frentes geradas por ciclones oceânicos possuem sempre o mesmo deslocamento de sul a norte. Sendo a estação SCAQ o ponto mais ao sul da região estudada e o mais distante das cadeias montanhosas, seria então o primeiro local onde a massa d'água tem efeito sem que haja limitantes topográficos, podendo sofrer os maiores efeitos das frentes. Por outro lado, a estação NEIA se encontra na região mais ao norte, ligeiramente após as cadeias montanhosas da região de Guaraqueçaba, que podem vir a atuar como barreiras para a dinâmica de frentes, represando parte do vapor d'água, e permitindo que os valores fiquem mais estáveis.

O estudo mostrou que as estações com menor correlação foram justamente NEIA e SCAQ (87,25%), e as com maior correlação foram PIR e UFPR (98,51%). A análise das componentes principais também apresentou forte correlação dos dados, sendo que 94,18% da similaridade dos conjuntos originais puderam ser expressas na primeira componente. Esses resultados representam um forte padrão de comportamento entre as seis séries analisadas. Os carregamentos indicaram que todas as estações podem ser englobadas em uma mesma região homogênea, e, caso fosse necessário classificar as estações em sub-regiões, seriam quatro divisões: UFPR e PIR; ANT e CEM; apenas SCAQ; e apenas NEIA. Este resultado, assim como as informações de correlação, reforça o fato de que SCAQ e NEIA podem vir a sofrer influências diferentes das demais estações.

A etapa do teste de homogeneidade provou que em termos de vapor d'água, a altimetria deve ser considerada fator importante, uma vez que classificou a região não-homogênea ao englobar as estações de maiores altitudes e litorâneas no mesmo teste. Quando agrupadas as estações de maiores altitudes e as estações litorâneas em dois grupos distintos, o teste mostrou homogeneidade em ambos os casos. Ao se aplicar o teste simulando-se o conjunto de dados de UFPR e PIR com menos 11,48 mm, o estudo comprovou que as todas as estações são homogêneas. Ao confrontar apenas as estações SCAQ e NEIA em único teste, este indicou também

homogeneidade, reforçando que as suposições anteriormente citadas, referente a estas duas estações, devem ser investigadas com maiores detalhes.

A interpolação pelo método do inverso da distância foi invalidada para todos os pontos de verificação, sendo que apresentou forte tendência, influenciada pelo pequeno número de estações disponíveis, e pelas diferenças altimétricas entre eles. Claramente a estação ANT, que se encontra bem próximo ao pé da serra, apresentou maior impacto das fontes de erro citadas. A interpolação por krigagem universal melhorou os resultados para CEM e PIR, mas piorou os resultados para ANT, devido ao impacto da modelagem tendenciosa do semivariograma teórico, que devido a não modelagem da dependência altimétrica apresentou forte tendência. Esta interpolação também foi invalidada, apresentado resultado satisfatório apenas para CEM. Após a consideração da dependência da altitude por meio co-krigagem colocalizada (ponderando-se a krigagem universal pela altitude), os resultados foram mais satisfatórios. Verificou-se que na estação ANT houve melhora de 149,55% para a raiz do erro médio quadrático e de 79,24% para o coeficiente de determinação, em comparação com o método do inverso da distância. Para CEM, entretanto, os resultados pioraram, fazendo com que esta estação, que no método anterior havia sido aceita pelo teste de hipótese, agora fosse rejeitada. ANT e PIR, por outro lado, foram aceitas, mesmo havendo significativa tendência na primeira, que permitiu aceitação apenas a nível de significância de 4%.

Os arquivos interpolados refletiram a variação temporal dos efeitos da dinâmica de frente, sendo observado um padrão toda vez que uma massa de ar passa pelo local. Ao comparar os resultados com as cartas sinópticas do INPE, verificou-se que o conteúdo de vapor d'água passa a aumentar 48 h antes da passagem da frente; 12 h antes ocorrem instabilidades na concentração de vapor local; e ligeiramente após a passagem da massa de ar, uma brusca queda ocorre, devido ao aumento da pressão atmosférica. Constatou-se que a componente tendência da série temporal foi a melhor para identificar as passagens de frente registradas.

Espera-se com estes resultados instigar a comunidade científica na utilização de dados GNSS para aperfeiçoamento de estudos de tempo e clima, fornecendo observações para alimentar modelos numéricos de previsão de tempo, estudar variações climáticas locais e monitorar e prever eventos associados à dinâmica de frentes; de modo prático e exigindo-se menor performance computacional e intervenção humana.

6. RECOMENDAÇÕES

Ao decorrer da presente dissertação, o autor identificou os possíveis assuntos para serem melhor investigados em novas pesquisas para complementar os estudos aqui descritos, á saber:

- Comparar valores ZWD fornecidos pelo PPP-IBGE com aqueles modelados por meio de dados provenientes de estações atmosféricas;
- Investigar os efeitos atuantes nas estações SCAQ e ANT, de modo a entender as sutis diferenças encontradas em seus respectivos conjuntos de dados;
- Estender a metodologia de interpolação apresentada pelo autor para outras regiões de estudo, preferencialmente aumentando-se o número de estações de apoio, de modo a verificar sua performance;
- Realizar estudos de padrões de passagem de frentes em séries temporais PWV para períodos maiores de observação;
- Conduzir investigações sobre a correlação das séries temporais com ocorrência de precipitação na região de estudo;
- Empregar o método do posicionamento relativo cinemático como metodologia extra para validar perfis de PWV conforme variação de altitude; e
- Aplicar análises de decomposição espectral às séries temporais PWV-GNSS de modo a analisar efeitos sazonais.

REFERÊNCIAS

ALMAZÁN, J. A. *et. al.* **A semiempirical error estimation technique for PWV derived from atmospheric radiosonde data.** *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 9, n. 1, p. 4759-4781. 2016. Disponível em: < <https://www.atmos-meas-tech.net/9/4759/2016/amt-9-4759-2016.pdf>>. Acesso em: 30/03/2019.

ALRADDAWI, D.; SARKISSIAN, A.; KECKHUT, P.; et al. Comparison of total water vapour content in the Arctic derived from GNSS, AIRS, MODIS and SCIAMACHY. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 11, n. 5, p. 2949–2965, 2018. Disponível em: <<https://www.atmos-meas-tech.net/11/2949/2018/>>. Acesso em: 30/03/2019.

ANA, Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/15>>. Acesso em: 23/01/2020.

AMAGUA, C. G. P. **Avaliação do impacto do efeito de carga por pressão atmosférica em posicionamento GPS de alta precisão nas regiões do Equador continental e da Amazônia brasileira.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

ANDERSON, T.W. **An introduction to multivariate statistical analysis.** 6 ed. Nova Iorque: Wiley, 2003. 374p.

ANDREWS, D. G. *et. al.* **Middle atmosphere dynamics.** Academic Press: Orlando, 1987.

BADESCU, G. *et. al.* **Some Aspects of Using Modern GNSS-RTK type technology in agriculture.** In.:5th *International Conference on Applied Economics, Business and Development (AEBD'13)*, 2013.Chania, Grécia. Anais ...Chania: AEBD'13, 2013, p. 252 – 258. Disponível em: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Chania/AEBDb/AEBDb-41.pdf>>. Acesso em: 10/11/2018.

BARONI, L.; KUGA, H. K. **Analysis of Attitude Determination Methods Using GPS Carrier Phase Measurements.** *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2012, p. 1–10, 2012. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/596396/>>.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J.; **Atmosfera, tempo e clima.** Bookman: Porto Alegre, 2013.

BENEVIDES, P. J. S. da C. **Estimação do campo tridimensional do vapor de água troposférico através de técnicas de tomografia por GNSS e InSAR**. Tese (Doutorado em Engenharia Geográfica), Setor de Ciências Geofísicas e da Geoinformação, Universidade de Lisboa. 2016. Disponível em: < <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/24856>>. Acesso em: 01/11/2018.

BERG, H. **Allgemeine Meteorologie**. Dümmler: Bonn, 1948.

BERNADI, A. C. C. NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Embrapa: Brasília, 2014.

BEVIS, M. *et. al.* **GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapour using the Global Positioning System**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97. 15 pg. 1992.

BLUM, C. T.; ROERJAN, C. V.; GALVÃO, F. **O Clima e sua Influência na Distribuição da Floresta Ombrófila Densa na Serra da Prata, Morretes, Paraná**. Revista FLORESTA, v. 41, n. 3p. 589-598. Curitiba, 2011.

BOCK, O.; GUICHARD, F.; JANICOT, S.; *et al.* Multiscale analysis of precipitable water vapor over Africa from GPS data and ECMWF analyses. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 9, 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2006GL028039>>.

BOEHM, J. **Vienna mapping functions in VLBI analyses**. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 1, p. L01603, 2004. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003GL018984>>.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. **Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data**. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n. 7, p. L07304, 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL025546>>.

BÖHM J. *et. al.* **Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather data**. *Geophysical Research Letters*, v. 22, n.1, 2006.

BONAFINI, F. C. **Matemática e Estatística**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

BONATO, J. V. R. **Clusterização de dados meteorológicos para comparação de técnicas Nowcasting**. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2014.

BUSSAB, W. de O.; MORETTIN, L. G. **Estatística Básica**. 9 ed. São Paulo: Saraiva. 2017.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

CARVALHO FILHO, G. L. de. **Estimativa do vapor d'água integrado utilizando dados de estações GNSS terrestres para aplicações na troposfera sobre as cidades de Natal e Mossoró, no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil**. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas), Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

CARVALHO, J.R.P. de; QUEIROZ, E.F. de. **Uso da cokrigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação**. Comunicado técnico, 21. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002.

CUNHA, A.K.; OLIVEIRA, I. S.; HARTMANN, M. T. **Arunofauna da Colônia Castelhanos, na Área de Proteção Ambiental de Guaratuba, Serra do Mar Paranaense**. Biotemas, v. 23, p. 123-134. Florianópolis, 2010.

DACH, S. L.; WALSER, P.; FRIDEZ, P. **Bernese GNSS Software Version 5.2**. Manual de usuário. Instituto Astronômico, Universidade de Bern. 2015.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Orienta sobre Riscos Climáticos no Cultivo de Cevada**. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/56885191/zoneamento-orienta-sobre-riscos-climaticos-no-cultivo-de-cevada>>. Acesso em: 23/01/2020.

EURIQUES, J. F. **Determinação da umidade do solo por meio da técnica de refletometria GNSS por multicaminho**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

FALCO, G. **Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios**. *Sensors*, v. 17. 2017.

FALCO, G.; PINI, M.; MARUCCO, G. **Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios**. Sensors, v. 17, n. 2, p. 255, 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/255>>.

FERREIRA, D.F. **Estatística Multivariada**. 675p. Lavras: UFLA, 2011.

FONSECA, B. H. F. **Um estudo sobre estimação e predição em modelos geoestatísticos bivariados**, 5. mar. 2009. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11134/tde-13042009-165056/>>.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 1.ed. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319 p.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. **Geodésia Celeste**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2003.

GIBBONS, J. D.; CHAKRABORTI, S. **Nonparametric Statistical Inference**. 4. Ed. Alabama: Marcel Dekker, Inc., 2003.

GOAD C.; GOODMAN L. **Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model**. União Geofísica da Transamérica. Washington D.C., 1974.

GOMES, A. R.; MALDONADO, F. D. **Análise de componentes principais em imagens multitemporais TM/Landsat como subsídio aos estudos de vulnerabilidade à perda de solo em ambiente semi-árido**. Anais de Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 9. (SBSR). São José dos Campos: INPE, 1998. p. 959-968. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.10.05>>. Acesso em: 30/05/2019.

GONÇALVES, R. C. **Análise de frequência regional de ventos extremos no Paraná**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

GOUVEIA, T. A. F. **Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/86823>. Acesso em: 22/06/2020.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais e robusta avaliação utilizando observações GNSS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/86823>. Acesso em: 30/03/2019.

HASS, J. *et. al.* **Feasibility of meteorological rainfall forecast to improve hydroplant reservoir inflows forecasts**. In. *WORLD WATER CONGRESS*, Anais do XV IWRA International Water Resources Association, v. 1, p.1-11. Madrid, 2003.

HE, J.; LIU, Z. **Comparison of Satellite-Derived Precipitable Water Vapor Through Near-Infrared Remote Sensing Channels**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 57, n. 12, p. 10252–10262, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8812891/>>.

HEGARTY, C. J.; KAPLAN, E. D. **Understanding GPS Principles and Applications**. 2 ed. Norwood: Artech House, 2006.

HOFMANN-WELLENHOLF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E.; **GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Wien: Springer, 2008.

HOPFIELD, H. S. **Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data**. *Journal of Geophysical Research*, v. 74, 1969.

HOSKING, J. R. M. **L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics**. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, v. 52, n. 1, p. 105–124, 1990. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>>.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis**. Cambridge University Press, 1997.

HOSSAIN, F.; GEBREMICHAEL, M. **Satellite rainfall applications for surface hydrology**. Springer: Nova Iorque, 2010.

HUANG, L.; LIU, L.; CHEN, H.; JIANG, W. **An improved atmospheric weighted mean temperature model and its impact on GNSS precipitable water vapor estimates for China**. GPS Solutions, v. 23, n. 2, p. 51, 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10291-019-0843-1>>.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Plano de Gestão Ambiental da APA de Guaraqueçaba**. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/pm_apa_guaraquecaba.pdf>. Acesso em: 23/01/2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual do Usuário do Aplicativo Online PPP-IBGE**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20/02/2019.

IERS, *International Earth Rotation and Reference System Service*. Boletins Técnicos, 2019. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/Bulletins/bulletins.html>>. Acesso em: 25/05/2019.

IGS, *International GNSS Service*. Página online. Disponível em: <<http://www.igs.org>>. Acesso em: 20/02/2019.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://agricultura.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 23/01/2020.

IPARDES, Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Diagnóstico Físico-Ambiental da Serra do Mar**. Disponível em: <<http://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Relatorios-de-Pesquisa-1991>>. Acesso em: 23/01/2020.

ITCG, Instituto de Terras, Cartografia e Geociências. Disponível em: <<http://www.patrimoniocultural.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=87>>. Acesso em: 23/01/2020.

KARABATIĆ, A.; WEBER, R.; HAIDEN, T. **Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria**. Advances in Space Research, v. 47, n. 10, p. 1691–1703, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117710007118>>.

KLOBUCHAR, J. **Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. AES-23, n. 3, p. 325–331, 1987. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4104345/>>.

KOUBA, J. **Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses.** *Journal Of Geodesy*, v. 83, n. 3-4, p.199-208, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/226357140_Testing_of_global_pressuretemperature_GPT_model_and_global_mapping_function_GMF_in_GPS_analyses . Acesso em: 08/02/2018.

KOUSKY, V. E.; **Frontal Influences on Northeast Brazil.** *Monthly Weather Review*, v. 107, n. 9, p.1140-1153. 1979. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/249619721_Frontal_Influences_on_Northeast_Brazil>. Acesso em: 10/11/2018.

KOUSKY, V. E.; MOLION, L. C. **Uma contribuição a climatologia da dinâmica da troposfera sobre a Amazônia.** *Acta Amazônica*, Manaus, v.15, n. 3/4, p. 311-320. 1985. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0044-59671985000200311&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 02/02/2019.

KRUEGER, C. P. **Posicionamento por satélites.** Apostila do Curso de Especialização em Geotecnologias – Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

KRUEGER, C. P., **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito Marinho.** Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

KUGA, H. K.; BARONI, L. **Analysis of Attitud Determination Methods Using GPS Carrier Phase Measurements.** *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2012, 2013. Disponível em: <http://www.dem.inpe.br/~hkk/2012/Baroni&Kuga-MPE596396-Pub.pdf>>. Acesso em: 10/11/2018.

KURSINSKI, E. E.; HAJJ, G. A.; HARDY, K.; ROMANS, L.; SCHOFIELD, J.; **Observing Tropospheric Water Vapour by Radio Occultation using the Global Positioning System.** *Journal of Geophysical Research Letters*, vol. 22. 17 pg. 1995.

LAGLER, K.; SCHINDELEGGER, M.; BÖHM, J.; KRÁSNÁ, H.; NILSSON, T. **GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques.** *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 6, p. 1069–1073, 2013. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/grl.50288>>.

LAROCCA, A. P. C. **Análise de estratégias para processamento de redes geodésicas com o sistema de posicionamento global - GPS,** 10. mar. 2000. São Carlos: Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-24052006-101143/>>.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada.** 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEHMANN, E. L.; D'ABRERA, H. J. M. **Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks**. Holden-Daym, California, 1975. p. 264.

LI, X.; ZUS, F.; LU, C.; et al. **Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations**. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 10, p. 4173–4181, 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015GL063856>>.

LI, Z. *et. al.* **Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements**. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, v. 108, n. D20. 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/29818690_Comparison_of_precipitable_water_vapor_derived_from_radiosonde_GPS_and_Moderate-Resolution_Imaging_Spectroradiometer_measurements>. Acesso em: 30/03/2019.

LIANG, H.; CAO, Y.; WAN, X.; et al. **Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China**. *Geodesy and Geodynamics*, v. 6, n. 2, p. 135–142, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674984715000142>>.

MANSUR, G. B. **Comportamento dos relógios dos satélites GPS: correções e análises**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

MARÍN, J. C. *et. al.* **Estimating and forecasting the precipitable water vapour from GOES satellite data at high altitudes sites**. *Astronomy and Astrophysics*, v. 573, n. A41, p. 1-10. 2015. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/ref/2015/01/aa24460-14/aa24460-14.html>>. Acesso em: 30/03/2019.

MARINI, J. W. **Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile**. *Radio Science*, v. 7, n. 2, p. 223–231, 1972. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/RS007i002p00223>>. Acesso em: 10/11/2018.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

MATTOS, L. F. **Frontogênese na américa do sul e precursores de friagem no estado de são paulo**. 215 f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/01.05.09.13/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 10/11/2018.

MAURER, E. P.; HIDALGO, H. G. **Utility of daily vs monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods.** *Hydrology Earth System Science Discussion*. 2008.

MIRANDA, J. I. EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas.** Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2005.

MOCOCHINSKI, A. Y. **CAMPOS DE ALTITUDE NA SERRA DO MAR PARANAENSE: ASPECTOS FLORÍSTICOS E ESTRUTURAIS.** 2006. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/24770/D%20-%20MOCOCHINSKI,%20ALAN%20YUKIO.pdf?sequence=1> . Acesso em: 10/11/2018.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão.** 1 ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2015.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** 2 ed. Presidente Prudente: Editora Unesp, 2008.

MONICO, J. F. G. **GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão.** Projeto FAPESP na modalidade temático. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, SP. 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade.** 7ª ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2016.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola.** Livraria Novel: São Paulo, 1981.

MUNYATI, C. **Use of Principal Component Analysis (PCA) of Remote Sensing Images in Wetland Change Detection on the Kafue Flats, Zambia.** *Geocarto International*, v. 19, n. 3, p. 11–22, 2004. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106040408542313>>.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A.; **Hidrologia Estatística.** 561 pgs. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NAMAOU, H.; KAHLOUCHE, S.; BELBACHIR, A. H.; VAN MALDEREN, R.; BRENOT, H.; POTTIAUX, E. **GPS Water Vapor And Its Comparison With Radiosonde And ERA-Interim Data In Algeria.** *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 34, no. 5, pp. 623–634, 2017.

NIELL, A. E. **Preliminary Evaluation of Atmospheric Mapping Functions Based on Numerical Weather Models**. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy. v. 26., p. 475-480. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464189501000874?via%3Dihub>>. Acesso em: 10/11/2018.

NEWBY, S.P.; Langley R.B. **Three alternative empirical ionospheric models -Are they better than the GPS Broadcast Model?**. Anais do 6º Simpósio Geodésico Internacional em Posicionamento por Satélites, pg. 240–244. Columbus, 1992.

NING, T.; HAAS, R.; ELGERED, G.; WILLÉN, U. **Multi-technique comparisons of 10 years of wet delay estimates on the west coast of Sweden**. Journal of Geodesy, v. 86, n. 7, p. 565–575, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-011-0527-2>>.

NOAA, *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/numerical-weather-prediction>>. Acesso em: 12/06/2020.

OLIVEIRA JR., P. S. **Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/149241>. Acesso em: 30/03/2019.

OLIVEIRA, A. S. **Interacoes entre sistemas frontais na América do Sul e a conveccao da Amazonia**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OLIVER, M.A. **Geostatistical Applications for Precision Agriculture**. Springer, Dordrecht. 2010.

PARKINSON, B. W.; SPIKER JR., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Vol. 1. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. 1997.

PINTO, M. O. *et. al.* **Influência da Combinação de Dados GPS e GLONASS no Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba v. 19, n. 1, p. 135 – 151, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bcg/v19n1/a09v19n1>>. Acesso em: 10/11/2018.

PREISENDORFER, R. W.; MOBLEY, C. D. **Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography**. California: Elsevier, 1988.

QIMIN, H.; ZHANG, K.; WU, S.; ZHAO Q. **Real-Time GNSS-Derived PWV for Typhoon Characterizations: A Case Study for Super Typhoon Mangkhut in Hong Kong**. Journal of Remote Sensing, v. 12, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/1/104>>. Acesso em: 12/06/2020.

RABIER, F. **Overview of global data assimilation developments in numerical weather-prediction centres**. *Royal Meteorological Society*, v. 131, n. 1, p. 3215-3233, 2005. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1256/qj.05.129>>. Acesso em: 12/04/2019.

RABIER, F. **Overview of global data assimilation developments in numerical weather-prediction centres**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 131, n. 613, p. 3215–3233, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1256/qj.05.129>>.

RENCHE, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. 2 ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002.

REYNAUD, F. **Desagregação espacial estatística da chuva prevista pelo modelo atmosférico WRF**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

SAASTAMOINEN, J. **Contributions to the theory of atmospheric refraction**. *Bulletin géodésique*, v. 107, n. 1, p. 13–34, 1973. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02522083>>.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a geodésia e a meteorologia**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA, R. A. F. DE. **Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 3, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2007000300004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; DE SOUZA, E. M.; CAMPOS, T. B. **Global Positioning System precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting**. *Meteorological Applications*, v. 26, n. 1, p. 49–63, 2019. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/met.1735>>.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2ª edição. Walter de Gruyter: Nova Iorque, 2003.

SELUCHI, M. *et. al.* **Características das frentes frias causadoras de chuvas intensas no leste de Santa Catarina**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 1, p. 25-37. 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v32n1/0102-7786-rbmet-32-01-0025.pdf>>. Acesso em: 05/02/2019.

SHOJI, Y.; MASHIKO, W.; YAMAUCHI, H.; SATO, E. **Estimation of Local-Scale Precipitable Water Vapor Distribution Around Each GNSS Station Using Slant Path Delay: Evaluation of a Severe Tornado Case Using High-Resolution NHM**. SOLA, v. 11, p. 31–35, 2015. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/11/0/11_2015-008/_article>.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**. 8 ed. Universidade Estadual de Iowa: Ames, 1989.

SOBRINO, J. A. J. **Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 1, p. 5161-5182. 2003.

SOBRINO, J. A.; EL KHARRAZ, J.; LI, Z.-L. **Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data**. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 24, p. 5161–5182, 2003. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0143116031000102502>>.

SPRENT, P. **Applied Nonparametric Statistical Methods**. 1. Ed. Londres: Chapman and Hall, 1989.

SZAFRANEK, K. **GNSS reference solution for permanent station stability monitoring and geodynamical investigations - the ASG-EUPOS case study**. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, p. 67–75, 2013. Disponível em: <http://www.irms.cas.cz/index_en.php?page=acta_detail_doi&id=15>.

UNAVCO (University NAVstar Consortium), 2018. **General Information – GNSS Modernization**. Disponível em: <https://www.unavco.org/projects/project-support/gnss-support/gnss-modernization/gnss-modernization.html>. Acesso: 04/06/2019.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. **O CLIMA DO LITORAL DO ESTADO DO PARANÁ**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 3, p.49-63,2008. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25423> . Acesso em: 20/11/2018.

VISKI, A. R. **Análise da Atenuação do Efeito Multicaminho no Posicionamento GPS de Plataformas Lagrangeanas e Eulerianas em Massas de Água.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

VITAE CIVILIS, Instituto para o Meio Ambiente, Desenvolvimento e Paz. **Panorama de Atores e Iniciativas no Brasil sobre Mudanças do Clima.** São Lourenço da Serra, 2008.

WAGNER, A.; BLECHSCHMIDT, A.-M.; BOUARAR, I.; et al. **Evaluation of the MACC operational forecast system – potential and challenges of global near-real-time modelling with respect to reactive gases in the troposphere.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 15, n. 24, p. 14005–14030, 2015. Disponível em: <<https://www.atmos-chem-phys.net/15/14005/2015/>>.

WANG, Z.; WU, Y.; ZHANG, K.; MENG, Y. **Triple-Frequency Method for High-Order Ionospheric Refractive Error Modelling in GPS Modernization.** *Journal of Global Positioning Systems*, v. 4, n. 1&2, p. 291–295, 2005. Disponível em: <<http://www.gnss.com.au/JoGPS/v4n12/v4n12p36.pdf>>.

WEBB, S. R. **Kinematic GNSS estimation of zenith wet delay over a range of altitudes.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 33, n. 1. 2016.

WEBB, S. R.; PENNA, N. T.; CLARKE, P. J.; et al. **Kinematic GNSS Estimation of Zenith Wet Delay over a Range of Altitudes.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 33, n. 1, p. 3–15, 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/jtech/article/33/1/3/4832/Kinematic-GNSS-Estimation-of-Zenith-Wet-Delay-over>>.

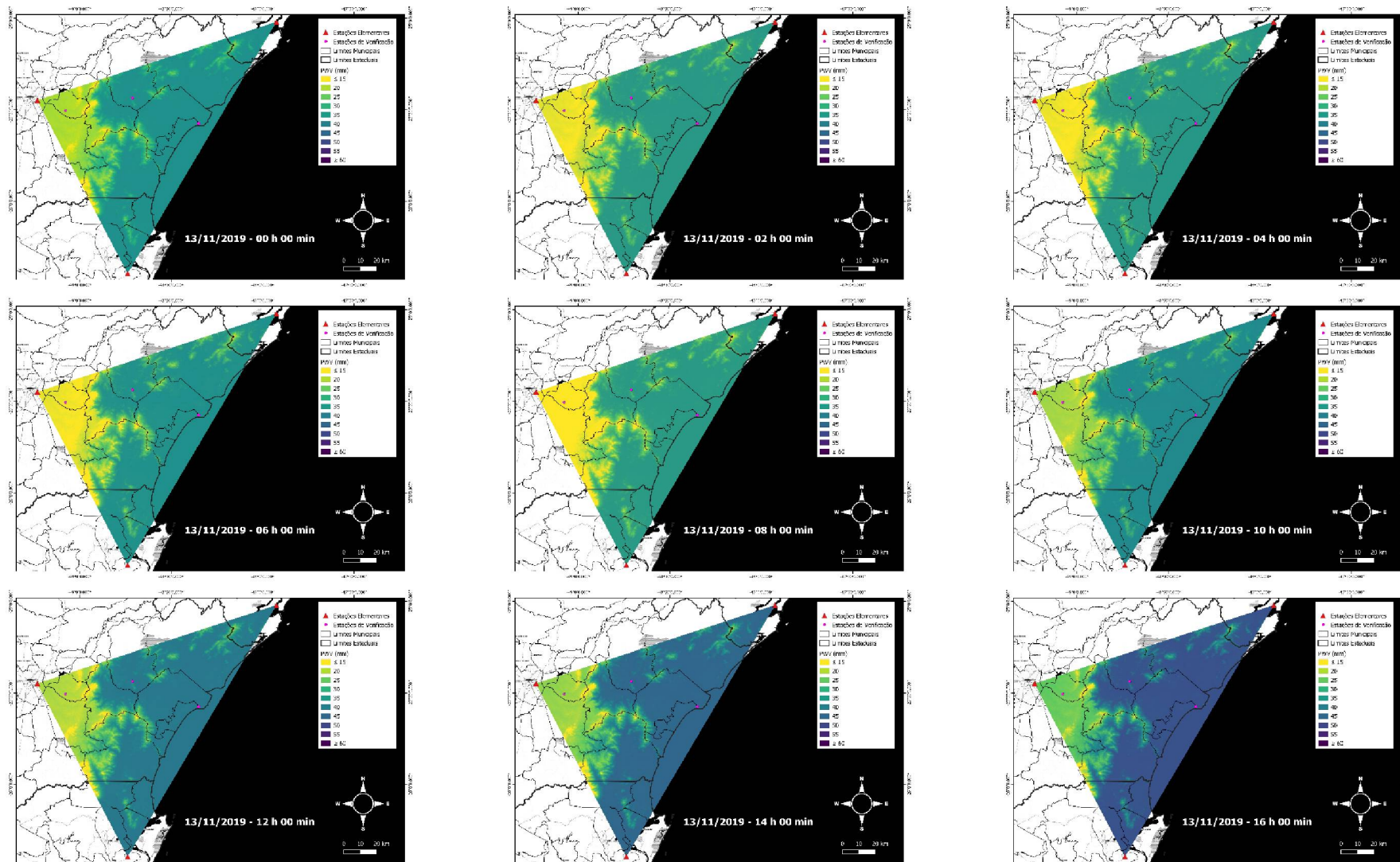
XAVIER, J. H. **Análise de estabilidade de uma rede local GPS situada no litoral paranaense.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

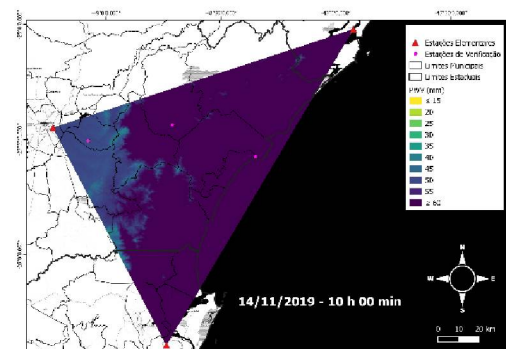
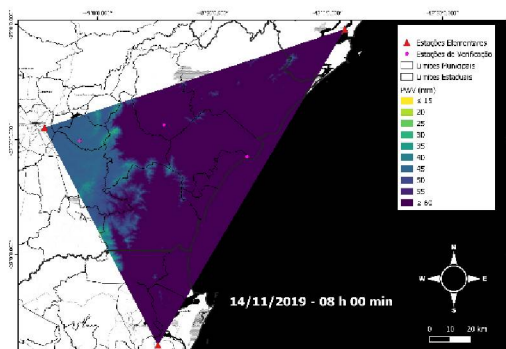
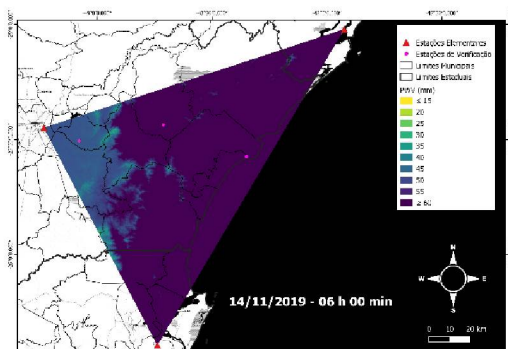
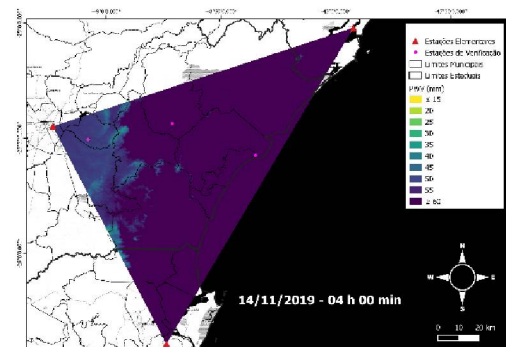
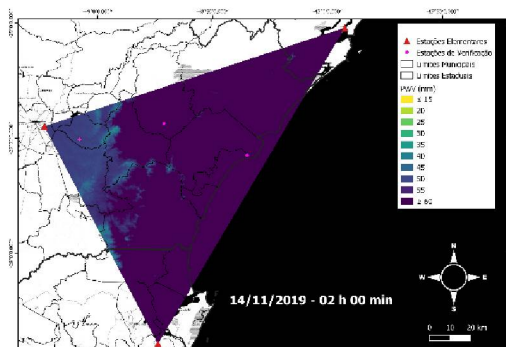
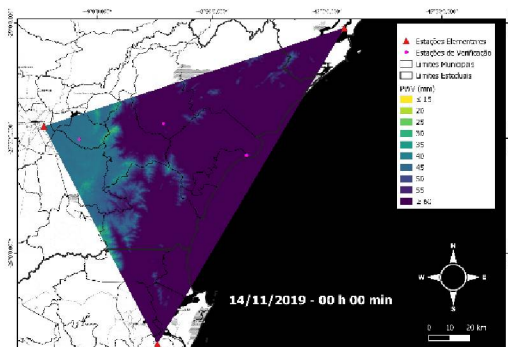
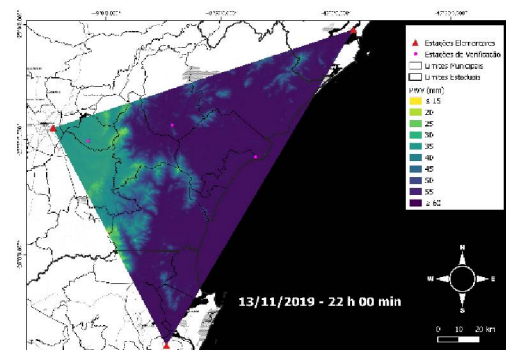
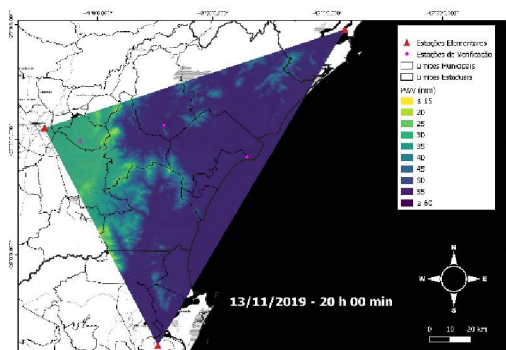
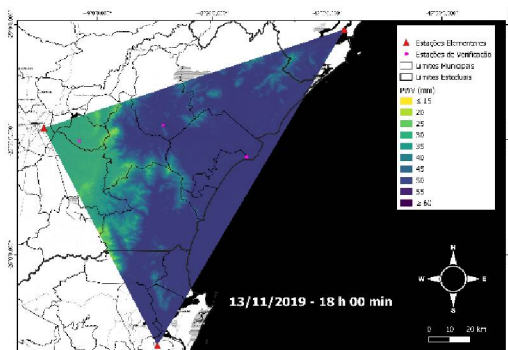
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos. 2013.

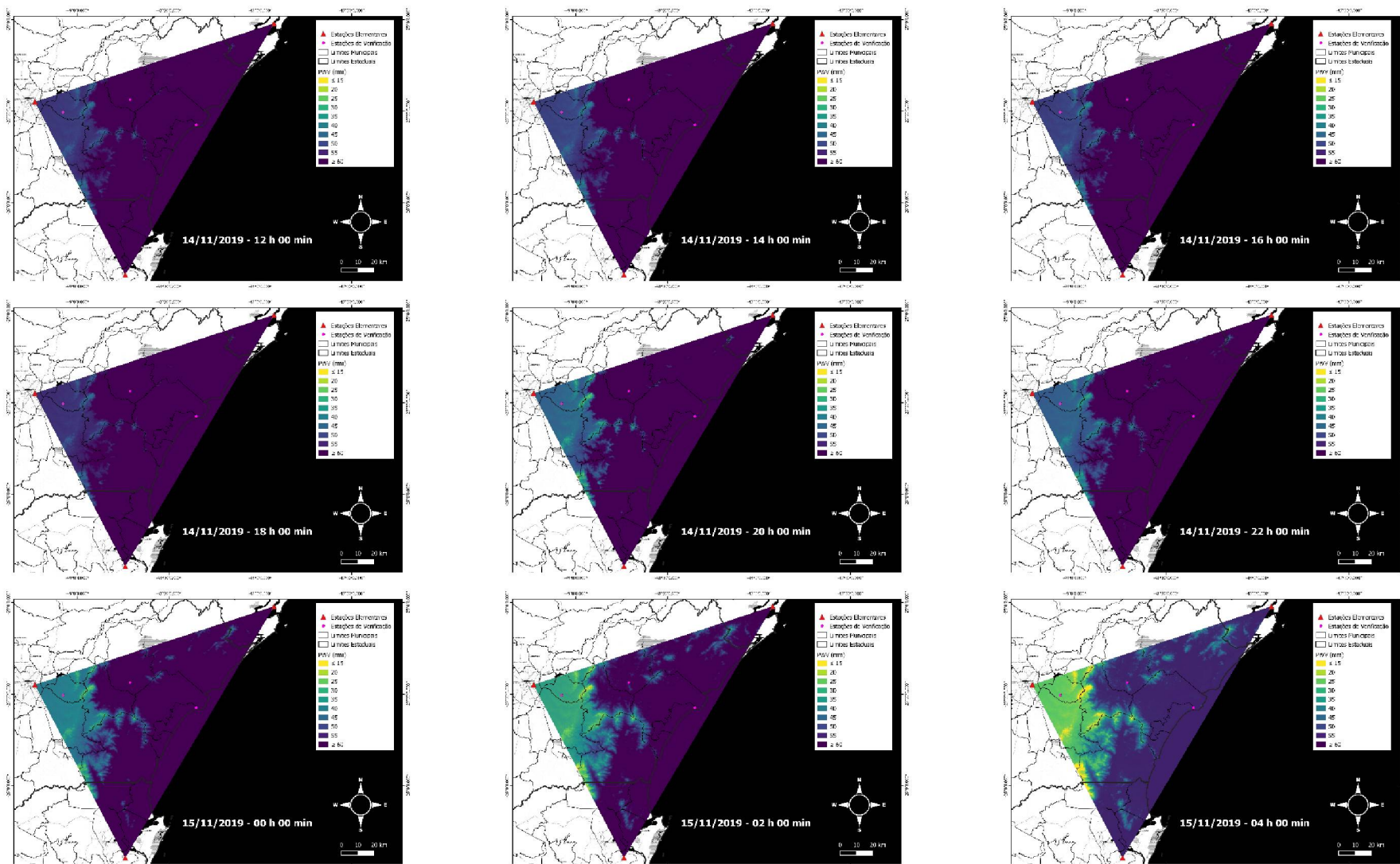
ANEXOS

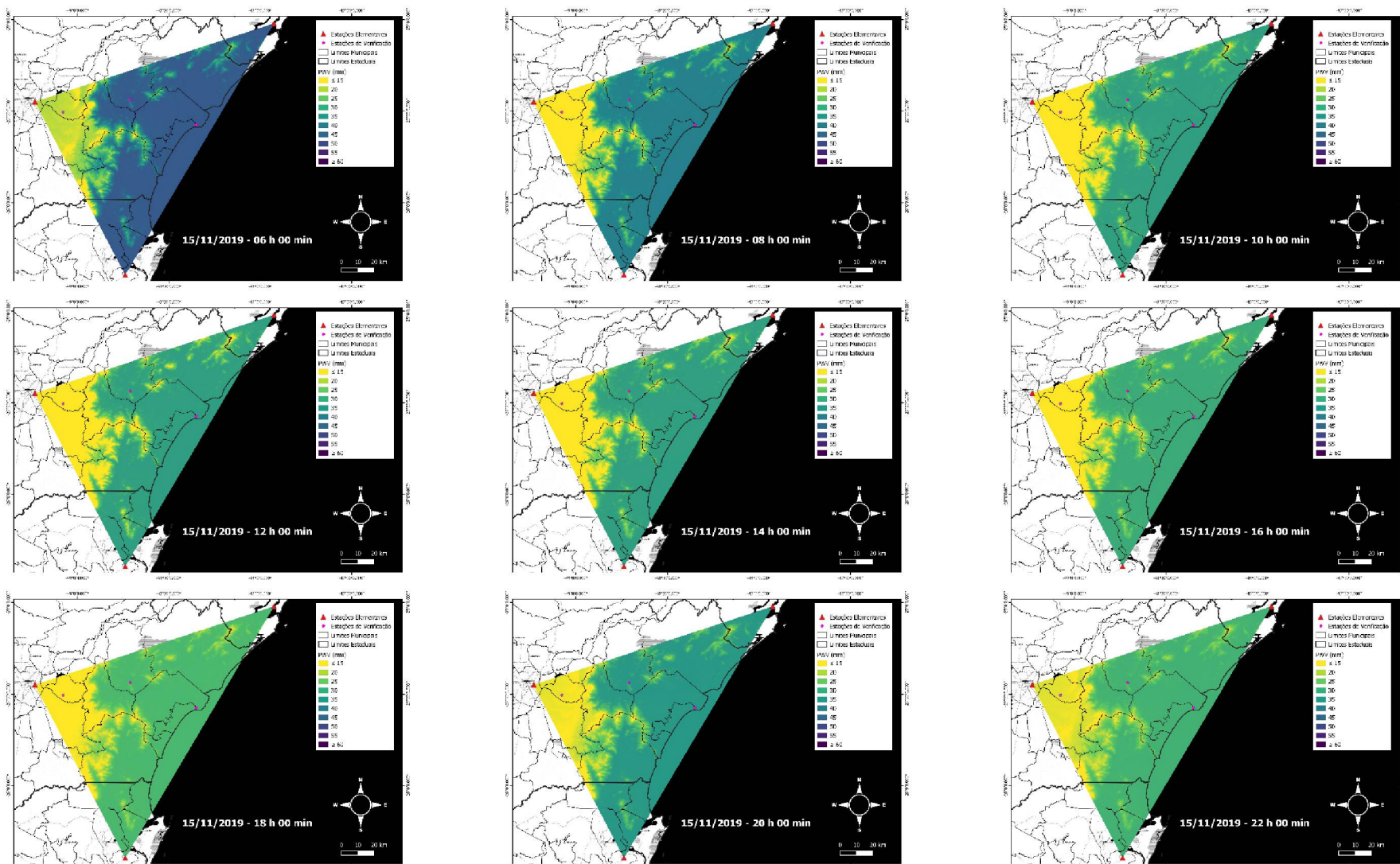
ANEXO 1 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 1ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL.....	146
ANEXO 2 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 2ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL.....	150
ANEXO 3 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 3ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL.....	154
ANEXO 4 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 4ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL.....	158

ANEXO 1 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 1ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL

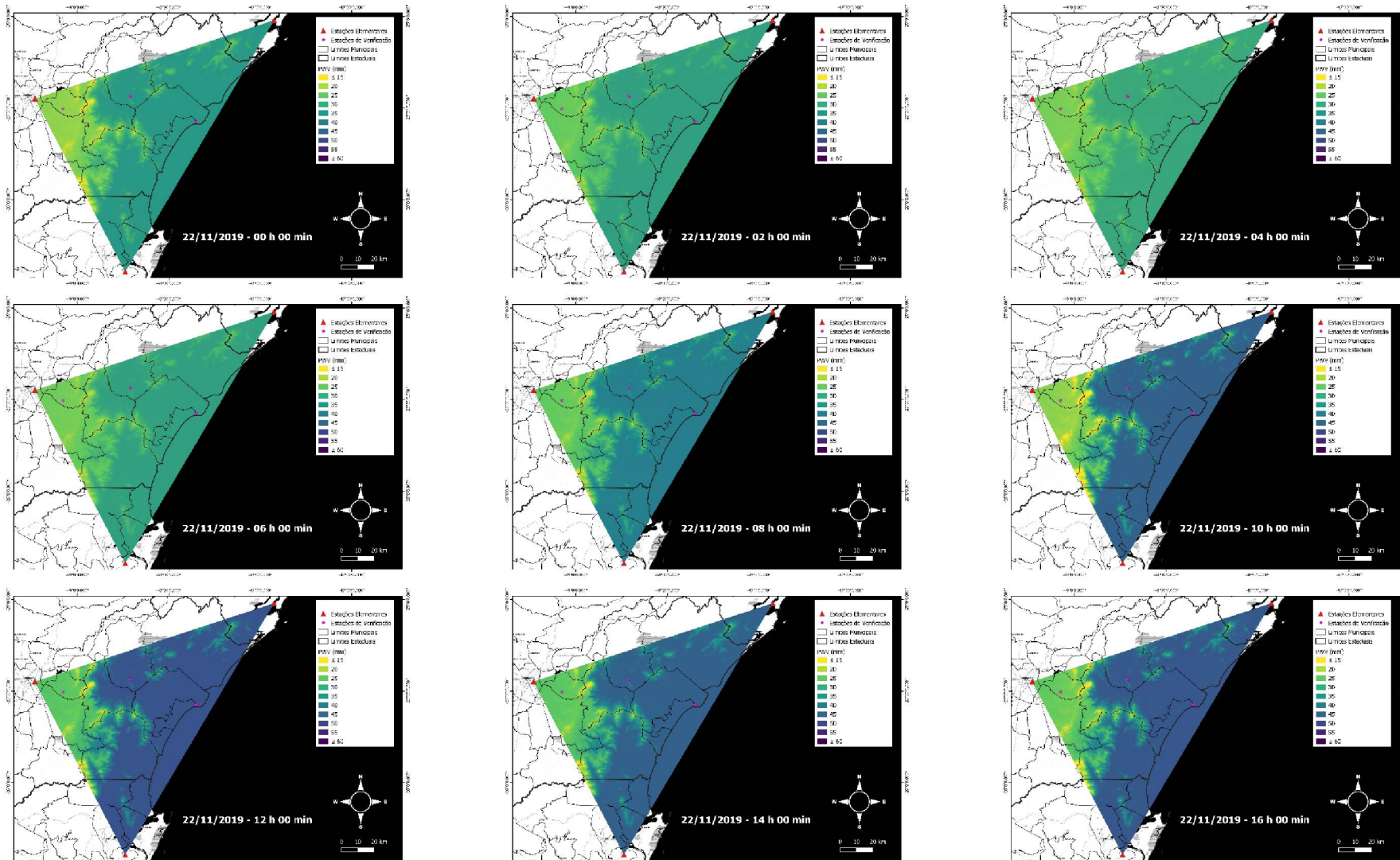


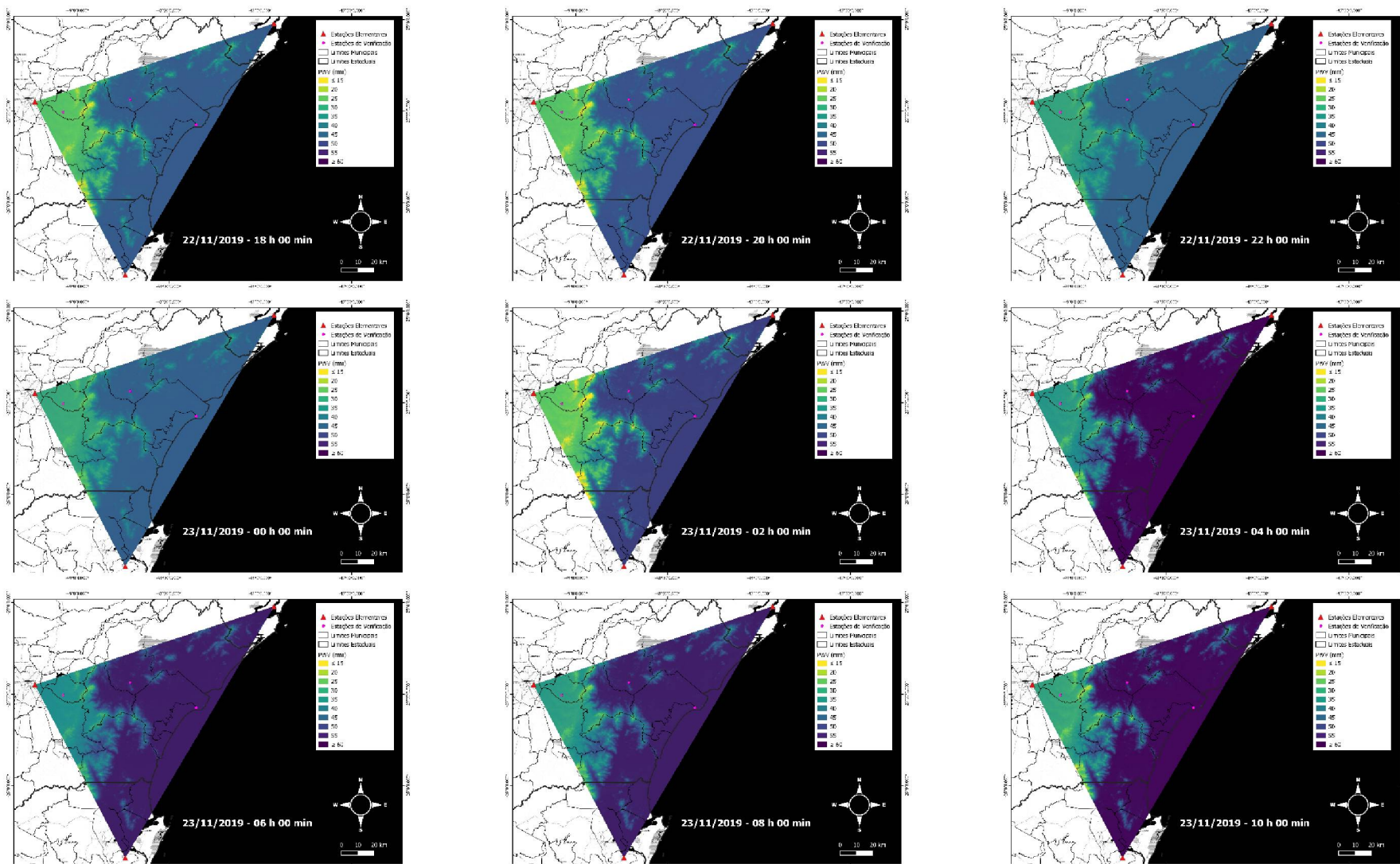


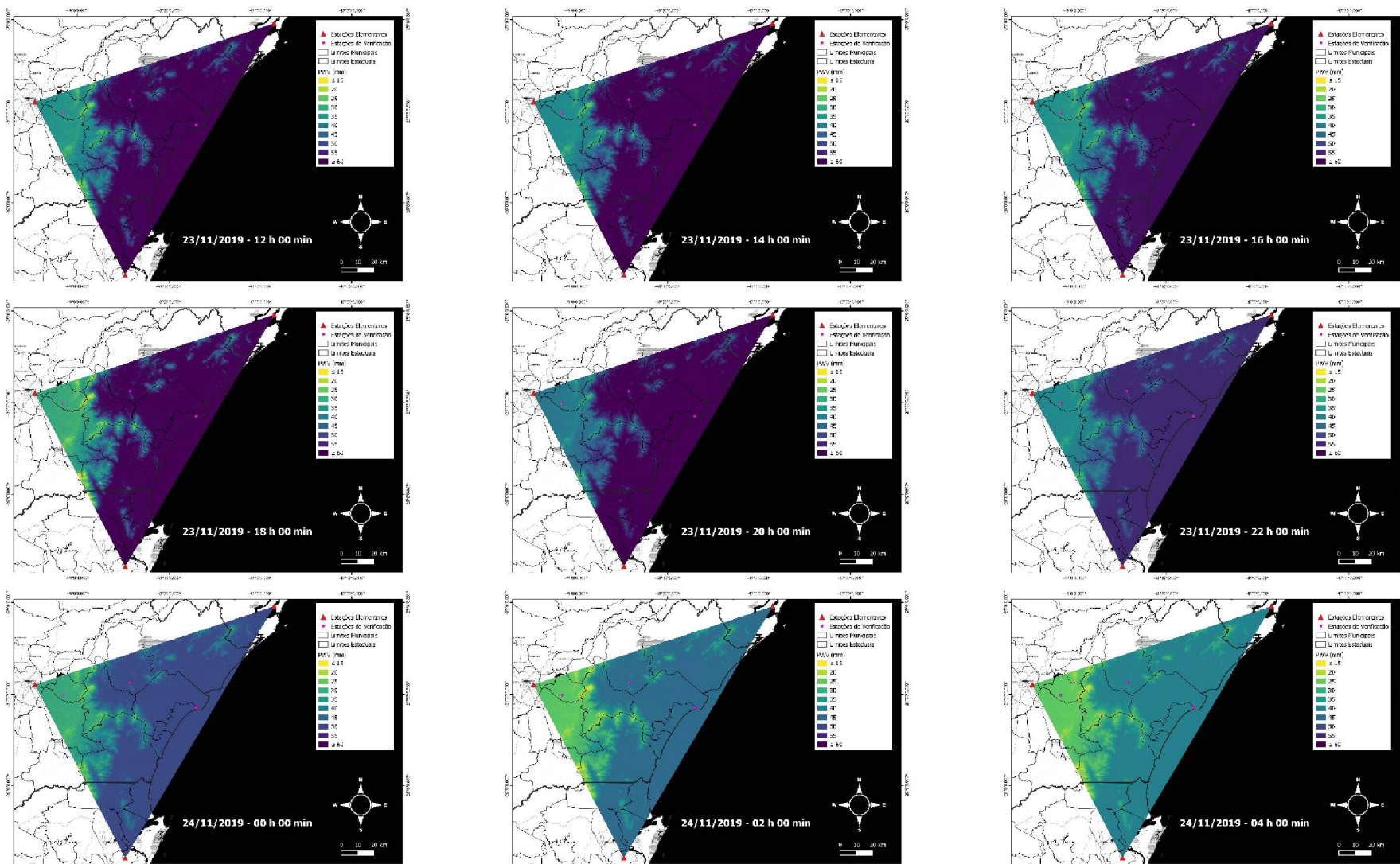


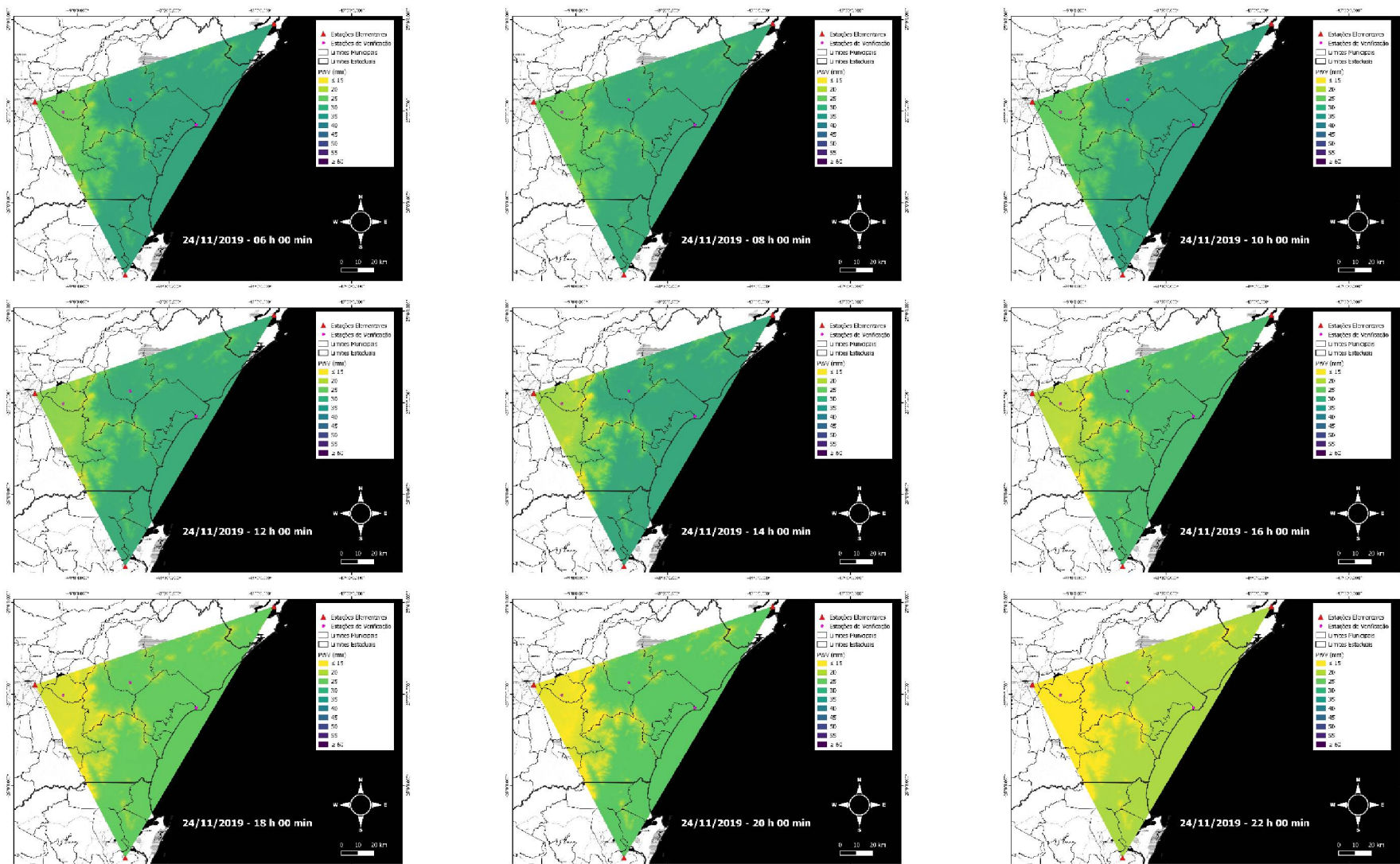


ANEXO 2 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 2ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL

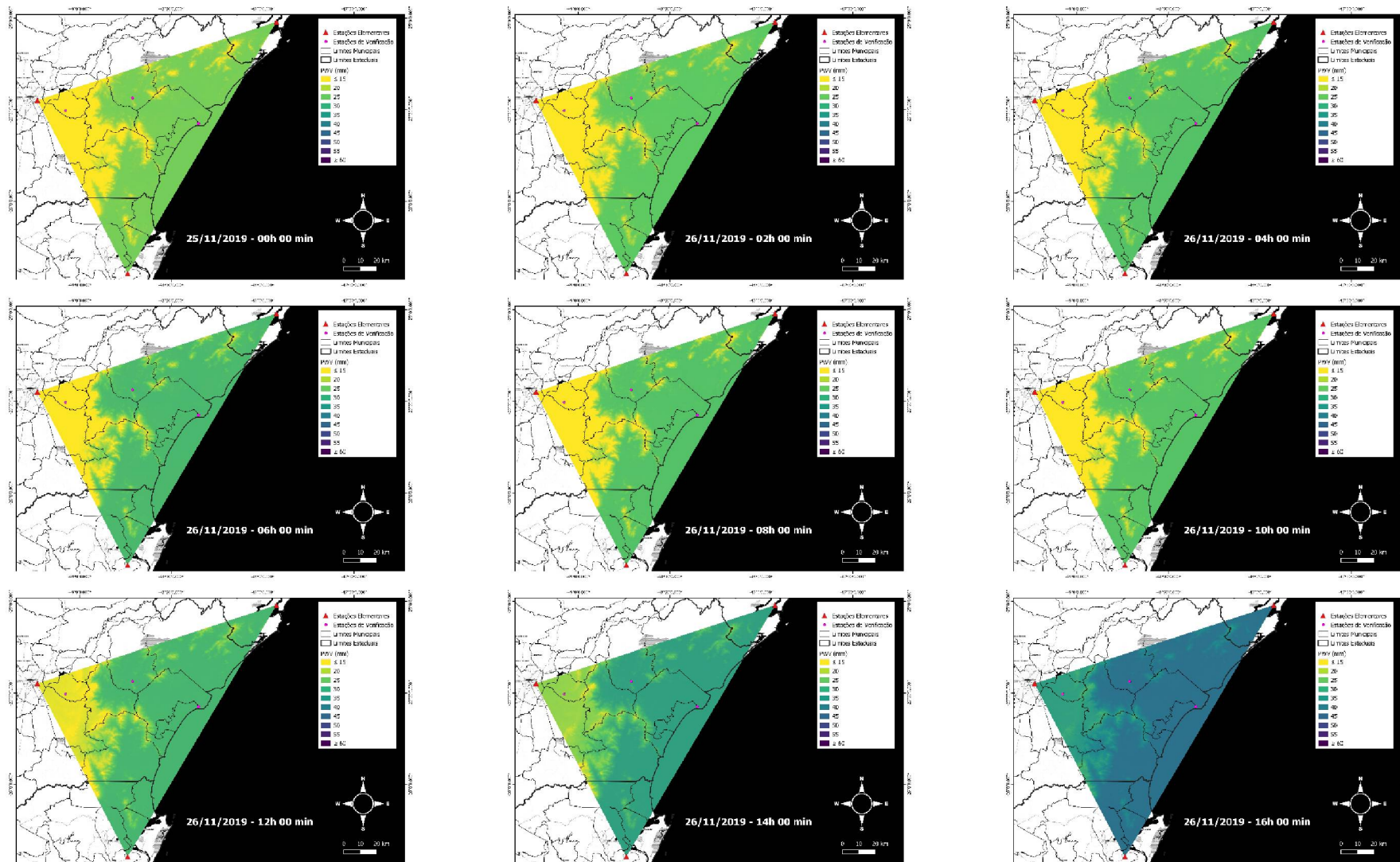


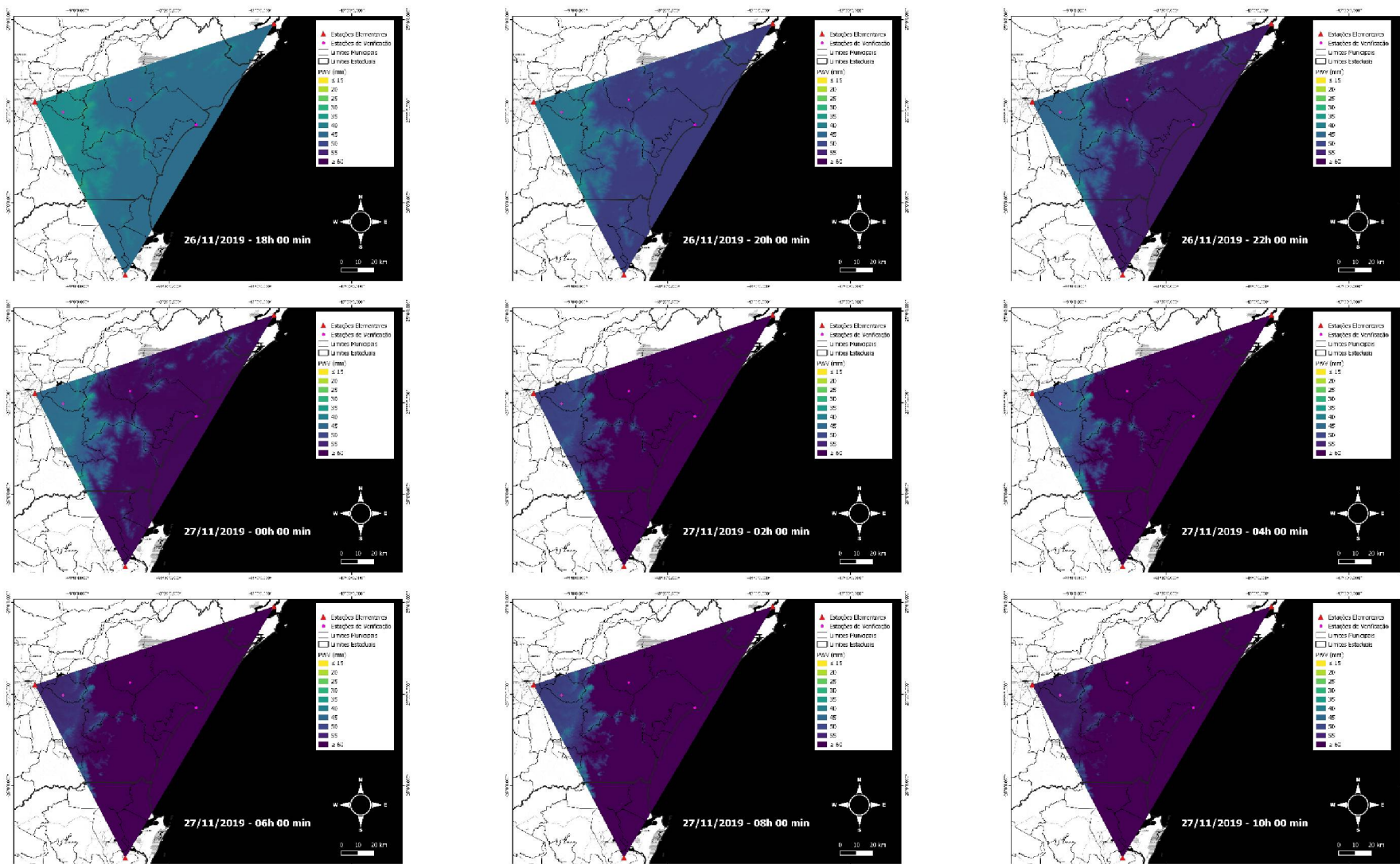


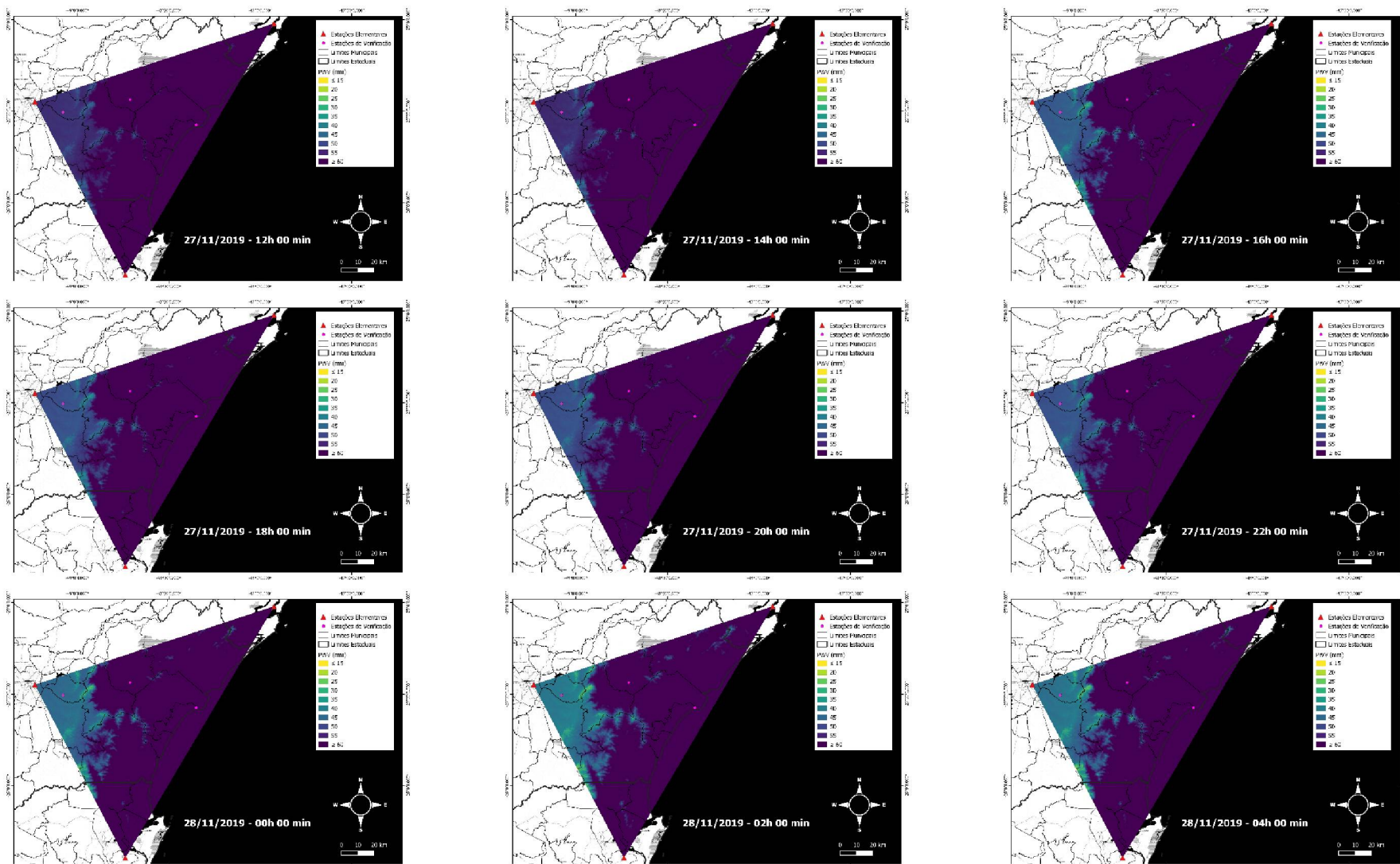


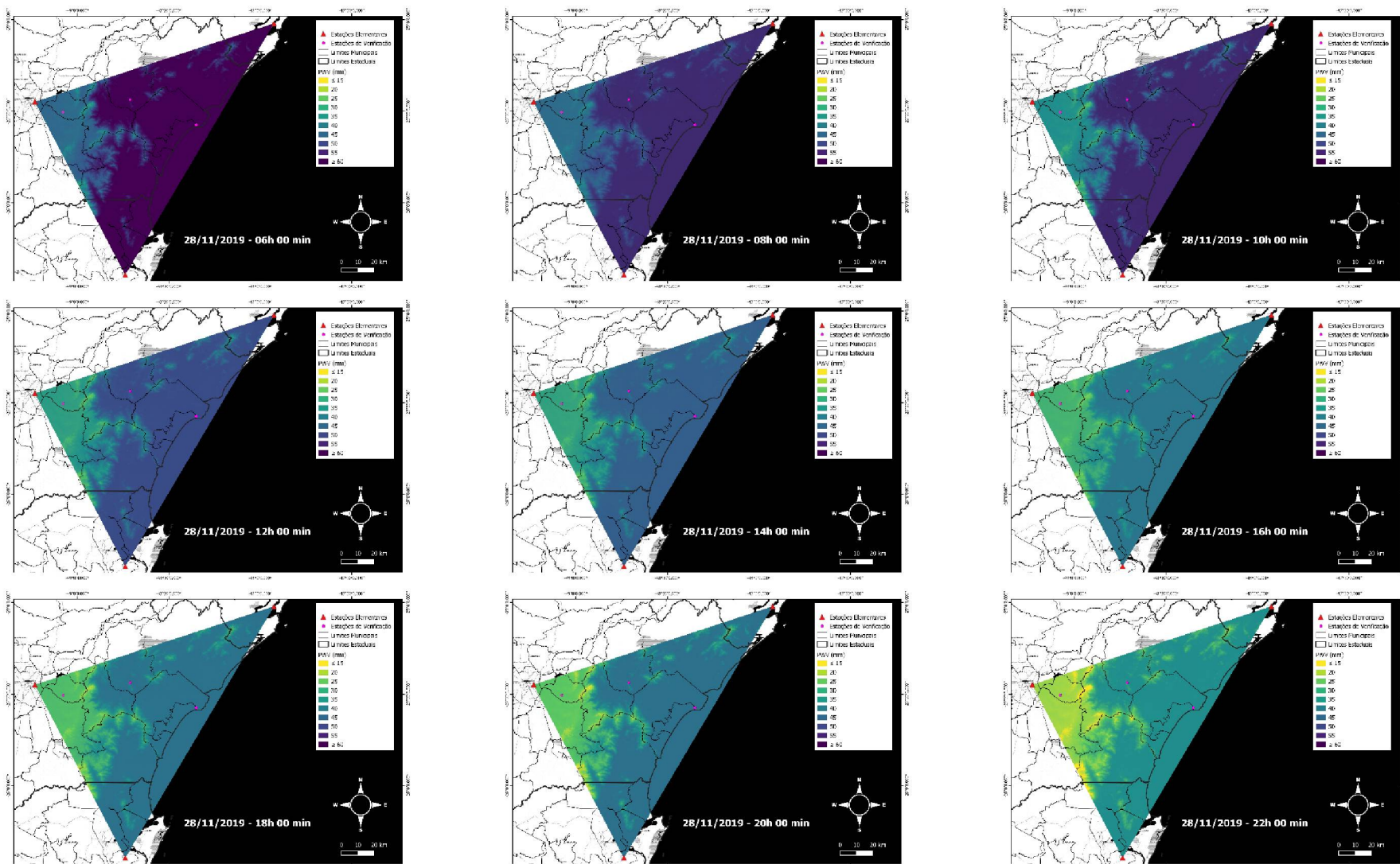


ANEXO 3 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 3ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL









ANEXO 4 – ESTIMATIVAS PWV-GNSS DURANTE 4ª PASSAGEM DE ZONA FRONTAL

